

21世纪全国本科院校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材

土木工程试验

主　编　王吉民



· 采用最新土木工程试验和检测技术的标准及规范
· 反映国内外土木工程试验和检测技术的最新进展





北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

说　明

本书电子版仅提供给高校任课教师使用，如有任课教师需要本书课件或其他相关教学资料，请联系北京大学出版社客服，微信手机同号：15600139606，扫下面二维码可直接联系。

由于教材版权所限，仅限任课教师索取，谢谢！



21 世纪全国本科院校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材

土木工程试验

主编　王吉民



内 容 提 要

本书是根据《高等学校土木工程本科指导性专业规范》的基本内容和要求编写的专业技术基础课教材，以结构试验的基本理论和基础知识为重点，注重理论与土木工程技术相结合。全书内容包括绪论、结构试验设计、结构试验的荷载与加载设备、结构试验的量测技术、结构模型试验、工程结构静载试验、工程结构动载试验、工程结构抗震试验、工程结构物的非破损检测技术、结构试验数据处理。

本书可作为高等院校土木工程专业的相关教材，也可供从事工程结构试验的专业人员和相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程试验/王吉民主编. —北京：北京大学出版社，2013.2
(21世纪全国本科院校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材)
ISBN 978-7-301-22063-4

Ⅰ.①土… Ⅱ.①王… Ⅲ.①土木工程—试验—高等学校—教材 Ⅳ.①TU-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第022469号

书　　名：土木工程试验
著作责任者：王吉民　主编
策 划 编 辑：吴　迪　卢　东
责 任 编 辑：伍大维
标 准 书 号：ISBN 978-7-301-22063-4/TU·0307
出 版 发 行：北京大学出版社
地　　址：北京市海淀区成府路205号　100871
网　　址：http://www.pup.cn　新浪官方微博：@北京大学出版社
电 子 信 箱：pup_6@163.com
电　　话：邮购部62752015　发行部62750672　编辑部62750667　出版部62754962
印　刷　者：
经　销　者：新华书店
787毫米×1092毫米　16开本　17.75印张　415千字
2013年2月第1版　2014年4月第2次印刷
定　　价：34.00元

目　录

第1章 绪　论

教学目标

了解土木工程结构试验的任务，了解土木工程结构试验的作用和分类，了解土木工程结构试验的发展方向。

教学要求

知识要点	能力要求	相关知识
结构试验的任务	(1) 了解结构试验可用以检验实际工程和发展结构的计算理论 (2) 了解结构试验所提供的实证是其他任何方法所不能取代的	试验对象 试验技术
结构试验的作用	(1) 了解结构试验是发展结构理论和计算方法的重要途径 (2) 了解结构试验是发现结构设计误区的主要手段 (3) 了解结构试验是验证结构理论的唯一方法 (4) 了解结构试验是工程结构质量鉴定的直接方式 (5) 了解结构试验是制定各类技术规范和技术标准的基础	结构理论 试验技术 质量鉴定 标准规范
结构试验的分类	了解分别按试验目的、对象、荷载性质、试验场地、持续时间、构件破坏与否的不同进行分类	


引言

土木工程结构试验是一项科学实践性很强的活动，是研究和发展工程结构新材料、新体系、新工艺以及探索结构设计新理论的重要手段，在工程结构科学研究和技术革新演变过程中，已成为一门真正的试验科学，是发展结构理论和完善工程设计方法的要求手段之一。通过本章的学习，读者可了解土木工程结构试验的任务、作用、分类和发展方向等有关结构试验的基本知识。

1.1　工程结构试验的任务

土木工程结构包括建筑结构、桥梁结构、地下结构、水工结构、隧道结构及各类特种结构等。这些工程结构都是以各种工程材料为主体构成的不同类型的承重构件相互连接而

成的组合体。为满足结构在功能及使用上的要求，必须使得这些结构在规定的使用期内能安全有效地承受外部及内部形成的各种作用。为了进行合理的设计，工程技术人员必须掌握在各种作用下结构的实际工作状态，了解结构构件的承载力、刚度、受力性能以及实际所具有的安全储备。

为了确保实现结构的功能，常采用以下三种途径。①理论分析：利用现有成熟的理论，计算分析结构在各种作用下的效应，使其满足规范、规程、标准的要求。②结构试验：对结构施加各种作用，通过测试技术评判结构是否满足要求。③计算机模拟：利用计算机程序模拟分析结构在各种作用下的效应，通过大量的参数分析，寻找其中的规律，从而解决结构功能问题。

上述三种解决结构功能的途径，彼此并不是独立的，而是互为指导和验证的关系。特别是随着土木工程结构的不断发展，结构越来越复杂，要确保这些结构功能的实现，这三种途径缺一不可。在结构分析中，一方面可以利用传统的理论计算方法，另一方面也可以利用试验方法，即通过结构试验，采用试验应力分析方法来解决。特别是电子计算机技术的发展，它为用数学模型方法进行计算分析创造了条件。同样，利用计算机控制的结构试验技术，为实现荷载模拟、数据采集、数据处理，以及整个试验过程实现自动化提供了有利条件，使结构试验技术的发展产生了根本性的变化。因此，结构试验仍然是发展结构理论和解决工程设计方法的主要手段之一，在结构工程学科的发展演变过程中形成的由结构试验、结构理论与结构计算构成的新学科结构中，结构试验本身也成为一门真正的试验科学。

土木工程结构试验的任务就是以土木工程结构物(实物或模型)为研究对象，以设备仪器为工具，以各种试验技术为手段，借助量测技术对结构物受作用后的性能进行观测，量测与结构工作性能有关的各种参数(变形、挠度、应变、振幅、频率……)，从强度、稳定性、刚度和抗裂性以及结构实际破坏形态来判断结构的实际工作性能，估计结构的承载能力，确定结构对使用要求的符合程度，并用以检验和发展结构的计算理论。例如以下三个任务。

(1) 钢筋混凝土简支梁在竖向静力荷载作用下，通过检测梁在不同受力阶段的挠度、角变位、截面应变和裂缝宽度等参数，分析梁的整个受力过程以及结构的强度、挠度和抗裂性能。

(2) 结构承受动力荷载作用时，可以测量结构的自振频率、阻尼系数、振幅和动应变等参量，研究结构的动力特性和结构对动力荷载的反应。

(3) 在结构抗震研究中，结构在低周反复荷载作用下，通过试验获得应力-变形关系滞回曲线，为分析抗震结构的强度、刚度、延性、刚度退化、变形能力等提供数据资料。

可见，土木工程结构试验的任务是以试验方式测定相关数据，由此反映结构或构件的工作性能、承载能力以及相应的安全度，为结构的安全使用或设计理论的建立提供科学依据。

1.2 工程结构试验的作用

1) 结构试验是发展结构理论和计算方法的重要途径

17 世纪初期，伽利略(1564—1642)首先研究了材料的强度问题，提出许多正确的理论。但他在 1638 年出版的著作中，也错误地认为受弯梁的断面应力分布是均匀受拉的。46 年后，法国物理学家马里奥脱和德国数学家兼哲学家莱布尼兹对这个假定提出了修正，

认为其应力分布不是均匀的，而是呈三角形分布的。其后，虎克和伯努利建立了平面假定。1713 年法国人巴朗进一步提出中和层的理论，认为受弯梁断面上的应力分布以中和层为界，一边受拉，另一边受压。由于当时无法验证，巴朗的理论只是一个假设，受弯梁断面上存在压应力的理论仍未被人们接受。

1767 年，法国科学家容格密里首先用简单的试验方法，令人信服地证明了断面上压应力的存在。他在一根简支梁的跨中，沿上缘受压区开槽，槽的方向与梁轴线垂直，槽内嵌入硬木垫块。试验证明，这种梁的承载能力丝毫不低于整体并未开槽的木梁。试验现象表明，只有梁的上缘受压力时，才可能有这样的结果。当时，科学家们对容格密里的这个试验给予了极高的评价，誉为“路标试验”。它总结了人们 100 多年来的探索成果，像十字路口的路标一样，为人们指出了进一步发展结构强度计算理论的正确方向和方法。

1821 年，法国科学院院士拿维叶从理论上推导了现代材料力学中受弯构件断面应力分布的计算公式。经过了 20 多年，才由法国科学院另一位院士阿莫列用试验的方法验证了这个公式。人类对这个问题曾进行了 200 多年的不断探索，至此才告一段落。从这段漫长的历程中可以看到，不仅对于验证理论，而且在选择正确的研究方法上，试验技术都起了重要的作用。

2）结构试验是发现结构设计误区的主要手段

人们对于框架矩形截面柱和圆形截面柱的受力特性认识较早，在工程设计中应用最为广泛。建筑设计技术发展到 20 世纪 80 年代，为了满足人们对建筑空间使用功能的需要，出现了异形截面柱框架，如“T”形、“L”形和“十”字形截面柱。起初，设计者认为矩形截面柱和异形截面柱在受力特性方面没有区别，只是截面形状不同，并误认为柱的受力特性与柱的截面形式无关。但通过试验证明，柱的受力特性与柱截面的形状有很大关系，矩形截面柱的破坏特征属于拉压型破坏，异形截面柱的破坏特征属于剪切型破坏，异形截面柱和矩形截面柱在受力性能方面有本质上的区别。

3）结构试验是验证结构理论的唯一方法

从最简单的受弯杆件截面应力分布的平截面假定理论、弹性力学平面应力问题中应力集中现象的计算理论，到比较复杂的结构平面分析理论和结构空间分析理论，都应通过试验加以证实。隔振结构、消能结构设计理论的发展也离不开结构试验研究成果的积累。

4）结构试验是工程结构质量鉴定的直接方式

已建的结构工程，由单一的结构构件到结构整体，不论进行质量鉴定的目的如何，最直接的检验方式仍是结构试验。例如，灾害或事故后建筑工程的评估、鉴定等。

5）结构试验是制定各类技术规范和技术标准的基础

为了使土木建筑技术能够健康的发展，需要制定一系列技术规范和技术标准。土木工程领域所使用的各类技术规范和技术标准都离不开结构试验成果。

我国现行的各种结构设计规范为了设计理论和设计方法的发展，不仅总结了大量已有科学试验的成果和经验，还进行了大量钢筋混凝土结构、砖石结构和钢结构的梁、柱、框架、节点、墙板、砌体等实体或缩尺模型的试验以及实体建筑物的试验研究，为我国编制各种结构设计规范提供了基本资料与试验数据。事实上，现行规范采用的钢筋混凝土结构构件和砖石结构的计算理论，绝大多数都是以试验研究的直接结果为基础的，这进一步体现了工程结构试验学科在发展和改进设计理论、设计方法上的作用。

1.3 结构试验的分类

1.3.1 按试验目的进行分类

1. 科研性试验

科学研究性试验的目的是验证结构设计计算的各种假定，通过制定各种设计规范，发展新的设计理论，改进设计计算方法，为发展和推广新结构、新材料及新工艺提供理论依据与实践经验。

(1) 验证结构设计理论的假定。

在结构设计中，人们经常为了计算上的方便，对结构计算图式和本构关系做某些简化。构件静力和动力分析中的本构关系的模型化，则完全是通过试验加以确定的。

(2) 为制定或修订设计规范提供依据。

在我国现行的各种工程结构设计规范制定或修订过程中，除了总结已有大量科学试验的成果和经验以外，为了理论和设计方法的发展，有目的地开展了大量钢筋混凝土结构、砌体结构和钢结构的梁、柱、框架、节点、墙板、砌体等实物和缩尺模型的试验，以及实体结构物的试验研究，从而为编制或修订各类结构设计规范提供了基本资料与试验数据。事实上，我国现行规范中所采用的钢筋混凝土结构构件和砌体结构的计算理论，几乎全部是以试验研究的直接结果为基础的，这也进一步体现了结构试验学科在发展结构设计理论和改进结构设计方法上的作用。

(3) 为发展和推广新结构新材料与新工艺提供实践经验。

随着建筑科学和基本建设发展的需要，新结构、新材料和新工艺不断涌现。例如，在钢筋混凝土结构中各种新钢种的应用，薄壁弯曲轻型钢结构的设计，升板、滑模施工工艺的发展，以及大跨度结构、高层建筑与特种结构的设计施工等。但是，一种新生材料的应用，一个新结构的设计和新工艺的施工，往往需要经过多次的工程实践与科学试验，即由实践到认识，由认识到实践的多次反复，从而积累资料，使设计计算理论不断改进和完善。

2. 生产性试验

生产性试验经常具有直接的生产目的。它以实际建筑物或结构构件为试验鉴定对象，经过试验对具体结构构件做出正确的技术结论，常用于解决以下问题。

(1) 综合鉴定重要工程和建筑的设计与施工质量。

对于一些比较重要的结构与工程，除了在设计阶段进行大量必要的试验研究外，在实际结构建成后，还要求通过试验，综合鉴定其质量的可靠程度。

(2) 对已建结构进行可靠性检验，以推断和估计结构的剩余寿命。

已建结构随着建造年代和使用时间的增加，结构物逐渐出现不同程度的老化现象，有的已到了老龄期、退化期或更换期，有的则到了危险期。为了保证已建建筑物的安全使用，尽可能地延长它的使用寿命和防止建筑物的破坏、倒塌等重大事故的发生，国内外对

建筑物的使用寿命，尤其对使用寿命中的剩余期限，即剩余寿命特别关注。通过对已建建筑物的观察、检测和分析，按可靠性鉴定规程评定结构所属的安全等级，由此来判断其可靠性和评估其剩余寿命。

（3）工程改建和加固，通过试验判断具体结构的实际承载能力。

既有建筑的扩建加层、加固或由于需要提高建筑抗震设防烈度而进行的加固等，对于在单凭理论计算得不到分析结论时，经常是通过试验确定这些结构的潜在能力，这在缺乏既有结构的设计计算与图样资料，而要求改变结构工作条件的情况下更有必要。

（4）鉴定预制构件的产品质量。

构件厂或现场生产的钢筋混凝土预制构件，在构件出厂或在现场安装之前，必须根据科学抽样试验的原则，按照预制构件质量检验评定标准和试验规程，通过一定数量的试件试验，以推断成批产品的质量。

（5）处理受灾结构和工程质量事故，通过试验鉴定提供技术依据。

对遭受地震、火灾、爆炸等而受损的结构，或在建造和使用过程中发现有严重缺陷的危险建筑，如施工质量事故、结构过度变形和严重开裂等，有必要通过详细的试验研究，鉴定结构受损或存在缺陷的程度，为确定是否加固以及具体加固方案提供技术依据。

1.3.2　按试验对象进行分类

1. 原型试验

原型试验的试验对象是实际结构或是按实物结构足尺复制的结构或构件，如核电站安全壳加压整体性的试验、工业厂房结构的刚度试验、楼盖承载能力试验以及桥梁在移动荷载作用下的动力特性试验等，均在实际结构上加载量测。另外在高层建筑上直接进行风振测试和通过环境随机振动测定结构动力特性等均属此类。在原型试验中另一类就是足尺结构或构件的试验。以往一般对构件的足尺试验做得较多的对象就是一根梁、一块板或一榀屋架之类的实物构件，它可以在实验室内试验，也可以在现场进行。

由于工程结构抗震研究的发展，国内外开始重视对结构整体性能的试验研究，因为通过对这类足尺结构物进行试验，可以对结构构造、各构件之间的相互作用、结构的整体刚度以及结构破坏阶段的实际工作性能进行全面观测了解。为了保证测试精度，防止环境因素对试验的干扰，目前国外已将这类足尺结构从现场转移到结构实验室内进行试验，如日本已在实验室内完成了七层房屋足尺结构的抗震拟静力试验。近年来国内大型结构实验室建设也已经考虑到这类试验的要求。

2. 模型试验

由于进行原型结构试验投资大、周期长、测量精度受环境因素等影响，在经济上或技术上存在一定困难。因此，人们在结构设计的方案阶段进行初步探索比较或对设计理论和计算方法进行科学研究时，可以采用按原型结构缩小的模型进行试验。

模型是仿照原型(真实结构)并按照一定比例关系复制而成的试验代表物，它具有实际结构的全部或部分特征。模型的设计制作及试验是根据相似理论，用适当的比例和相似的材料制成与原型几何相似的试验对象，在模型上施加相似力系(或称比例荷载)，使模型受力后重演原型结构的实际工作，最后按照相似理论由模型试验结果推算实际结构的工作。

为此，这类模型要求有比较严格的模拟条件，即要求做到几何相似、力学相似和材料相似。目前在实验室内进行的大量结构试验均属于这一类。

由于严格的相似条件给模型设计和试验带来一定的困难，在工程结构试验中尚有另一类型的模型。这类模型仅是原型结构缩小几何比例尺寸的试验代表物，将该类模型的试验结果与理论计算对比校核，用以研究结构的性能，验证设计假定与计算方法的正确性，并认为这些结果所证实的一般规律与计算理论可以推广到实际结构中去，这类试验就不一定要满足严格的相似条件了。上海体育馆的屋盖采用了直径为 125m 圆形的三向钢网架结构，就是通过一个 1/20 的模型试验来验证该体型网架的变形和内力分布，同时用以探求理论计算中不易发现的次应力等问题，通过试验数据与计算比较后得到了满意的结果。

1.3.3　按试验荷载性质进行分类

1. 静力试验

静力试验是结构试验中最常见的基本试验。因为大部分土木工程结构在使用过程中所承受的荷载是以静荷载为主，一般可以通过重物或各种类型的加载设备来实现和满足加载要求。静力试验的加载过程是从零开始逐步递增一直到结构破坏为止，也就是在一个不长的时间段内完成试验加载的全过程。因此，这类试验也称为“结构静力单调加载试验”。

静力加载试验最大的优点是加载设备相对简单，荷载可以逐步施加，还可以停下来仔细观察结构变形和裂缝的发展，给人们以最明确和清晰的破坏概念。在实际工作中，即使是承受动力荷载的结构，在试验过程中为了了解静力荷载作用下的工作特性，在动力试验之前往往也先进行静力试验，如结构构件的疲劳试验就是这样。静力试验的缺点是不能反映应变速率对结构性能的影响，特别是在结构抗震试验中静力试验的结果与任意一次确定性的非线性地震反应的结果都相差很远。

近年来由于探索结构抗震性能的需要，结构抗震试验无疑成为一种重要的手段。结构抗震静力试验是以静力的方式模拟地震作用的试验，它是一种通过施加控制荷载或控制变形作用于结构的周期性的反复静力荷载而进行试验，为区别于一般静力单调加载试验，一般称之为“低周反复静力加载试验”，也称之为“拟静力试验”。目前，国内外结构抗震试验较多集中在这一方面。

拟动力试验也是一种结构抗震试验方法，是将地震实际反应所产生的惯性力作为荷载加在试验结构上，使结构所产生的非线性力学特征与结构在实际地震动力作用下所经历的真实过程完全一致。由于这种试验是用静力方式进行的而不是在振动过程中完成的，故称为“拟动力试验”。

2. 动力试验

动力试验是指通过动力加载设备直接对结构或构件施加动力荷载的试验。对于在实际工作中主要承受动力作用的结构或构件，为了了解结构在动力荷载作用下的工作性能，一般要进行结构动力试验。例如，研究厂房结构承受吊车及动力设备作用下的动力特性，吊车梁和桥墩的疲劳强度与疲劳寿命问题，多层厂房由于楼层上机器设备振动产生的影响，高层建筑和高耸构筑物(塔桅、烟囱等)在风荷载作用下的动力问题，结构抗爆炸、抗冲击问题等。特别是在结构抗震性能的研究中，除了用上述静力加载模拟以外，更为理想的是

直接施加动力荷载进行试验。目前抗震试验一般用电液伺服加载设备或地震模拟振动台等设备来进行。对于现场或野外的动力试验，可利用环境随机振动试验测定结构的动力特性及模态参数。另外，还可以利用人工爆炸产生人工地震的方法甚至直接利用天然地震对结构进行抗震试验。由于荷载特性的不同，动力试验的加载设备和测试手段也与静力试验有很大的差别，并且要比静力试验复杂得多。

1.3.4　按试验场地进行分类

1. 实验室试验

实验室试验由于具备良好的工作条件，可以应用精密和灵敏的仪器设备进行试验，试验结果具有较高的准确度。甚至可以人为地创造一种适宜的工作环境，以减少或消除各种不利因素对试验的影响，所以适宜于进行研究性试验。这种试验可以在原型结构上进行，也可以在模型结构上进行，并可以将结构一直试验到破坏。近年来大型结构实验室的建设，特别是应用电子计算机控制试验，为发展足尺结构的整体试验和实现结构试验的自动化提供了更为有利的工作条件。

2. 现场试验

现场结构试验是指在生产或施工现场进行的实际结构的试验，较多用于生产性试验，试验对象主要是正在生产使用的已建结构或将要投入使用的新结构。由于受客观条件的干扰和影响，高精度高灵敏度的仪表设备的应用经常会受到限制，因此试验精度和准确度较差。特别是由于现场试验中没有实验室所用的固定加载设备和试验装置，对试验加载会带来较大的困难。但是，目前应用非破损检测技术手段进行现场试验，仍然可以获得近乎实际工作状态下的数据资料。

1.3.5　按试验持续时间进行分类

1. 短期荷载试验

短期荷载试验是指结构试验时限于试验条件、试验时间或其他各种因素和基于及时解决问题的需要，经常对实际承受长期荷载作用的结构构件，在试验时将荷载从零开始到最后结构破坏或某个阶段进行卸载的时间总共只有几十分钟、几小时或者几天。对于承受动荷载的结构，即使是结构的疲劳试验，整个加载过程也仅在几天内完成，与实际工作年限有一定差别。对于遭受地震、爆炸等特殊荷载作用时，整个试验加载过程只有几秒甚至是微秒或毫秒级的时间。这种试验实际上是一种瞬态的冲击试验，属于动力试验的范畴。严格地讲，这种短期荷载试验不能代表长年累月进行的长期荷载试验。这种由于具体的客观因素或技术的限制所产生的影响，在试验结果的分析和应用时须加以考虑。

2. 长期荷载试验

长期荷载试验是指结构在长期荷载作用下研究结构变形随时间变化的规律的试验，如混凝土的徐变、预应力结构中钢筋的松弛、钢筋混凝土构件裂缝的开展与刚度退化等都需

要进行静力荷载作用下的长期试验。这种长期荷载试验也可称为“持久试验”，它将连续进行几个月或几年时间，通过试验以获得结构的变形随时间变化的规律。为了保证试验的精度，对试验环境要有严格控制，如保持恒温、恒湿、防止振动影响等。所以，长期荷载试验一般是在实验室内进行的。如果能在现场对实际工作中的结构构件进行系统而长期的观测，则这样积累和获得数据资料对于研究结构的实际工作性能、进一步完善和发展结构理论都具有极为重要的意义。

1.3.6 按试验构件破坏与否进行分类

1. 非破坏性试验

非破坏性试验有使用性能检验和承载力检验，检验的对象可以是实际的结构或构件，也可以是足尺的模型。通过使用性能检验以证实结构或构件在规定荷载作用下不会出现过大的变形和损伤，而承载力检验则用于证实结构或构件的设计承载力。

2. 破坏性试验

破坏性试验的目的是为了掌握结构或构件由弹性阶段进入塑性阶段甚至破坏阶段时结构性能和破坏形态等试验资料，常用于确定结构或模型的实际承载力。实际上，原型结构的破坏性试验无论在费用上还是在方法上均存在一些具体的问题，特别是在结构进入破坏阶段后试验是比较困难的。因此，破坏性试验的对象一般以模型结构或构件为对象，也可以是足尺的模型或不再使用的结构或构件。

1.4 结构试验技术的新发展

现代科学技术的不断发展，为结构试验技术水平的提高创造了条件。同样，高水平的结构试验技术又促进了结构工程学科的不断发展和创新。现代结构试验技术和相关理论及方法在以下几个方面得以迅速发展。

1.4.1 先进的大型和超大型试验装置

在现代制造技术的支持下，大型结构试验设备不断投入使用，使加载设备模拟结构实际受力条件的能力越来越强。例如，电液伺服压力试验机的最大加载能力达到 50000kN，可以完成实际结构尺寸的高强度混凝土柱或钢柱的破坏性试验。模拟地震振动台台阵由多个独立振动台组成，当振动台排成一列时，可用于模拟桥梁结构遭遇地震作用；若排列成一个方阵，可用于模拟建筑结构遭遇地震作用。复杂多向加载系统可以使结构同时受到轴向压力、两个方向的水平推力和不同方向的扭矩，而且这类系统可以在动力条件下对试验结构反复加载。特别是大型风洞、大型离心机、大型火灾模拟结构试验系统等装置相继投入运行，使研究人员和工程师能够通过结构试验更准确地掌握结构性能，改善结构防灾抗灾能力，发展结构设计理论。

1.4.2　现代测试技术

现代测试技术的发展以新型高性能传感器和数据采集技术为主要方向。传感器是信号检测的工具，理想的传感器具有精度高、灵敏度高、抗干扰能力强、测量范围大、体积小、性能可靠等特点；利用微电子技术，使传感器具有一定的信号处理能力，形成所谓的“智能传感器”；新型光纤传感器可以在上千米范围内以毫米级的精度确定混凝土结构裂缝的位置；大量程高精度位移传感器可以在1000mm测量范围内，达到±0.001%的精度；基于无线通信的智能传感器网络已开始应用于大型工程结构的健康监测。此外，测试仪器的性能也得到极大的改进，特别是与计算机技术相结合后，数据采集技术发展更为迅速。高速数据采集器的采样频率达到500Hz，可以清楚地记录结构经受爆炸或高速冲击时响应信号前沿的瞬态特征。利用计算机存储技术，长时间、大容量的数据采集已不存在困难。

1.4.3　计算机技术的应用

计算机已成为结构试验必不可少的一部分。安装在传感器中的微处理器、数字信号处理器、数据存储和输出、数字信号分析和处理、试验数据的转换和表达等，都与计算机密切相关。多功能、高精度的大型试验设备(以电液伺服系统为代表)的控制系统于20世纪末告别了传统的模拟控制技术，进而采用了计算机控制技术，使试验设备能够快速地完成复杂的试验任务。以大型有限元分析软件为标志的结构分析技术也极大地促进了结构试验的发展。在结构试验前，通过计算分析预测结构性能，制订试验方案。完成结构试验后，通过计算仿真处理，结构试验数据对结构性能做出完整的描述。在结构抗震、抗风、抗火等研究方向和工程领域，计算机仿真技术和结构试验的结合越来越紧密。

1.4.4　基于网络的远程协同结构试验

互联网的飞速发展，为我们展现了一个崭新的世界。当外科手术专家通过互联网进行远程外科手术时，基于网络的远程结构试验体系也正在形成。20世纪末，美国国家科学基金会投入巨资建设“远程地震模拟网络”，希望通过远程网络将各个结构实验室联系起来，利用网络传输试验数据和试验控制信息，网络上各站点(结构实验室)在统一协调下进行联机结构试验，共享设备资源和信息资源，实现所谓“无墙实验室”的科学构想。我国也在积极开展这一领域的研究工作，并已开始进行网络联机结构抗震试验。基于网络的远程协同结构试验技术集结构工程、地震工程、计算机科学、信息技术和网络技术于一体，充分体现了现代科学技术相互渗透、交叉、融合的特点。

本 章 小 结

本章系统介绍了土木工程结构的试验意义、作用和目的，介绍了土木工程结构试验的分类和结构试验技术的发展历程。学习本章后应了解本门课程的内容，提高对本门课程重

要性的认识，了解土木工程结构试验在工程结构科学研究、计算理论的发展和技术创新等方面所起的重要作用。

思　考　题

1. 结构试验的作用是什么？
2. 土木工程结构试验分为哪几类？各类试验的目的是什么？
3. 简述你对土木工程结构测试技术发展的了解。



第 2 章　结构试验设计

教学目标

了解结构试验设计的主要环节；掌握结构试件的形状、尺寸、数目和构造的基本要求；掌握结构试验荷载的加载图式的选择和加载装置的设计；能够正确地确定观测项目，合理布置测点和选择量测仪器；掌握结构试验中试件、荷载和量测设计的内容及关系；了解材料力学性能与结构试验的关系、加载速度与应变速率的关系以及对材料本构关系的影响。

教学要求

知识要点	能 力 要 求	相关知识
结构试验的主要环节	(1) 掌握结构试验设计阶段、准备阶段、实施阶段和完成阶段的内容 (2) 理解各环节流程以及相互联系	
试件的形状、尺寸、数量及构造要求	(1) 掌握试件形状设计的要求 (2) 掌握试件尺寸设计的要求 (3) 掌握试件数量设计的要求 (4) 掌握构造措施设计的要求	边界条件 尺寸效应 正交设计法 量测方法
试件的荷载方案设计	(1) 理解试验加载图式的选择与设计 (2) 了解试验加载装置设计的要求 (3) 了解试验加载制度的内容	加载图式 就位形式
试验观测方案的设计	(1) 掌握观测项目确定的内容 (2) 掌握测点选择和布置的原则 (3) 掌握仪器选择与测读的方法	结构变形 测试布置
材料的力学性能与结构试验的关系	(1) 了解试件尺寸与形状对强度指标的影响 (2) 了解试验加载速度对强度指标的影响	尺寸效应 应变速率
试验大纲和试验报告	(1) 掌握试验大纲的具体内容 (2) 了解试验其他文件的内容	



引言

土木工程结构试验包括结构试验设计、结构试验准备、结构试验实施和结构试验结果分析等主要环

节，结构试验的实施必须做到有的放矢，试验过程如何安排、试件尺寸形状如何确定、试验荷载如何施加、试验观测方案如何设计等工作必须做到目标明确、设计合理，方能圆满地完成试验任务。因此在试验前对整个试验工作做出规划，对试件、试验荷载和试验观测进行合理设计，了解材料的力学性能与结构试验的关系，确定试验大纲，从而为整个结构试验工作的顺利进行打好基础。

2.1　结构试验的主要环节

结构试验大致可分为结构试验设计、结构试验准备、结构试验实施和结构试验结果分析等主要环节，每个环节的关系如图 2-1 所示。

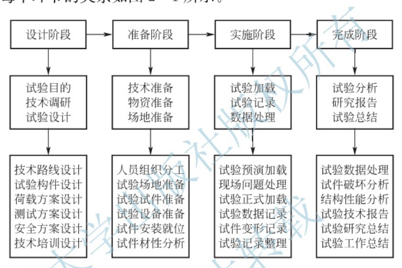


图 2-1　结构试验各环节流程

工程结构试验设计是整个试验中极为重要的并且带有全局性的一项工作，它的主要内容是对所要进行的结构试验工作进行全面的设计与规划，从而使设计的计划与试验大纲能对整个试验起到统管全局和具体指导作用。

在进行结构试验的总体设计时，首先应该反复研究试验的目的，充分了解本项试验研究或生产鉴定的任务要求，因为工程结构试验所具有的规模与所采用的试验方式都是根据试验研究的目的、任务、要求而确定的。试件的设计制作、加载和量测方法的确定等各个环节之间联系密切，不可单独考虑，必须对各种因素进行综合考虑，才能使设计意图在试验执行与实施中得以体现，最终达到预期的目的。

在明确试验目的后需着手调查研究并收集有关资料，确定试验的性质与规模、试件的尺寸与形状，然后根据一定的理论做出试件的具体设计。试件设计必须考虑本试验的特点与需要，在设计构造上提出相应的措施。在设计试件的同时，还需要注意以下问题：①分析试件在加载试验过程中各个阶段预期的内力和变形，特别是对具有代表性的并能反映整个试件工作状况的部位所测定的内力、变形数值，以便在试验过程中随时校核，并加以控制；②要选定试验场所，拟定加载与量测方案；③设计专用的试验设备、配件和仪表等，制定技术安全措施等。除技术上的安排外，还必须组织必要的人力、物力，针对试验的规模，组织参加试验的人员，并提出试验经费预算以及消耗性器材数量与试验设备清单。

在上述规划的基础上，提出试验研究大纲及试验进度计划。试验规划是指导试验工作

具体进行的技术文件，对每个试验、每次加载、每个测点与每个仪表都应该有十分明确的目的性与针对性。切忌盲目追求试验次数多，仪表测点多，以及不切实际的追求量测的高精度。否则有时反而会弄巧成拙，达不到预期的试验目的。有时为了解决某一具体的加载方案或量测方案，可先做一些试探性试验，以达到更好地规划整个试验研究的目的。

针对具体结构的工程现场鉴定性试验，在进行试验设计前必须对结构物进行实地考察，对该结构的现状和现场条件建立感性认识。在考虑试验对象的同时，还必须通过调查研究，收集有关文件和资料，如设计图样、计算书及作为设计依据的原始材料、施工文件、施工日志、材料性能试验报告和施工质量检查验收记录等。关于使用情况则需要深入现场向使用者(生产操作工人、业主等)调查了解。对于受灾损伤的结构，还必须了解灾害的起因、过程与结构的现状。对于实际调查的结果要及时整理(书面记录、草图、照片等)，作为拟定试验方案、进行试验设计的依据。

由于近代仪器设备和测试技术的不断发展，大量新型的加载设备和测量仪器被使用到土木工程结构试验中，这对试验工作者又提出了新的技术要求。对这方面的知识了解不够或微小疏忽，均会导致对整个试验不利的后果。所以在进行试验总体设计时，要求对所使用的仪器设备性能进行综合分析，对试验人员事先组织学习，掌握这方面的知识，以利于试验工作的顺利进行。

结构试验是一项细致而复杂的工作，因此必须进行很好的组织与设计，按照试验任务制订试验计划与大纲，并通过试验计划与大纲的执行来实现提出的要求。在整个试验工作中，试验人员必须严肃认真，否则不仅无法完成预期的试验任务，影响试验结果，而且会带来人力、物力与时间上的浪费，甚至导致整个试验失败，或危及人身安全。只有在试验前做好试验规划和准备工作，才能对试验过程中可能出现的状况事先有所估计，并采取相应预防措施，及时整理分析试验结果，做到使用最小的试验耗费取得最大的研究成果。

2.2　结构试验的试件设计

结构试验中试件的形式和大小与结构试验的目的有关，它可以是真实结构，也可以是其中的某一部分。当不能采用足尺的原型结构进行试验时，也可用缩尺的模型。据调查，全国各大型结构实验室所做的结构试验的试件，绝大部分为缩尺的部件，少量为整体模型试件。

采用模型试验可以大大节省材料，减少试验的工作量和缩短试验时间，用缩尺模型做结构试验时，应考虑试验模型与试验结构之间力学性能的相关关系。但是要想通过模型试验的结果来正确推断实际结构的工作，模型设计要做到完全相似往往有困难，此时应根据试验目的设法使主要的试验内容能满足相似条件。有关结构模型设计的内容在第 5 章中介绍。当然能用原型结构进行试验是较为理想的，但由于原型结构试验规模大，试验设备的容量和费用也大，所以大多数情况下还是采用缩尺的模型试验。基本构件的基本性能试验大都是用缩尺的构件，但它不一定存在缩尺比例的模拟问题，经常是由这类试件试验结果所得的数据，直接作为分析的依据。

试件设计应包括试件形状选择、试件尺寸与数量以及构造措施等，同时还必须满足结构与受力的边界条件、试件的破坏特征、试验加载条件的要求，以最少的试件数量获得最多的试验数据，反映研究的规律以满足研究的目的需要。

2.2.1 试件形状

试件设计的基本要求是构造一个与设计目的相一致的应力状态。对于静定结构中的单一构件，如梁、柱、桁架等，一般构件的实际形态都能满足要求，问题比较简单。但对于从整体结构中取出部分构件单独进行试验时，特别是比较复杂的超静定体系，必须要注意其边界条件的模拟，使其能如实反映该部分结构构件的实际工作状态。

如图 2-2(a)所示，当进行水平荷载作用的框架结构应力分析时，若试验 $A-A$ 部位的柱脚、柱头部分时，试件要设计成如图 2-2(b)所示的形状；若试验 $B-B$ 节头部分时，试件应设计成如图 2-2(c)所示的形状；对于梁，如设计成图 2-2(d)和图 2-2(e)所示的形状，则其应力状态可与设计目的相一致。

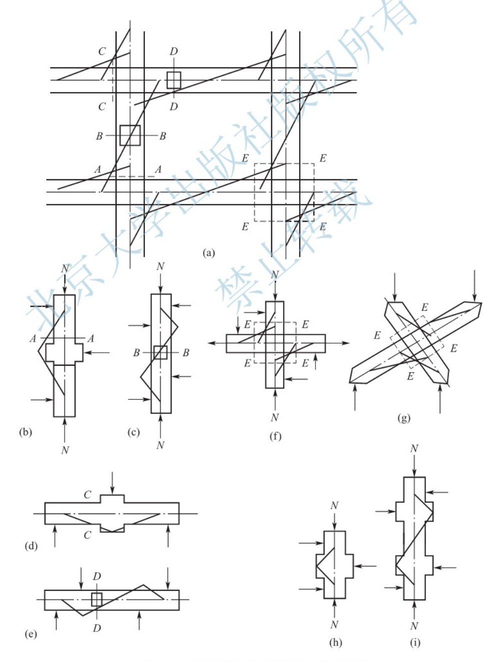


图 2-2 框架结构中的梁柱和节点试件

对于钢筋混凝土柱，若要进行挠曲破坏性能的研究，试件应设计成如图 2－2(h)所示的形状。但若做剪切性能的探讨，则反弯点附近的应力状态与实际应力情况有所不同，为此有必要采用图 2－2(i)中适用于反对称加载的试件。

在做梁柱连接的节点试验时，试件承受轴力、弯矩和剪力的作用，这样的复合应力使节点部分发生复杂的变形，但其中主要是剪切变形，以致节点部分由于大剪力作用而发生剪切破坏。为了探索节点的强度和刚度，使其应力状态能得到充分反映，避免在试验过程中梁柱部分先于节点破坏，在试件设计时必须先对梁柱部分进行适当加固，以使整个试验能达到预期的效果。图 2－2(f)所示的十字形节点两侧梁柱的长度一般均取 1/2 梁跨和 1/2 柱高，即按框架承受水平荷载时产生弯矩的反弯点($M=0$)的位置来决定。边柱节点可采用 T 形试件。如果试验目的是了解初始设计应力状态下的性能，并同理论计算做对比，可以采用如图 2－2(g)所示的 X 形试件。为了使在 X 形试件中再现实际的应力状态，必须根据设计条件给定的轴力 N 和剪力 V 来确定试件的尺寸。

又如在进行升板结构的节点试验时，其试件可取如图 2－3 所示的形状，板的两个方向的长度同样可按板带跨中反弯点($M=0$)的位置来决定。

在框架结构试验中，多数情况可设计成支座固接的单层单跨框架，如图 2－4 所示。

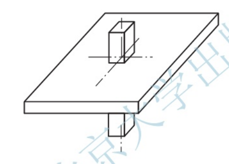


图 2－3　升板节点试件

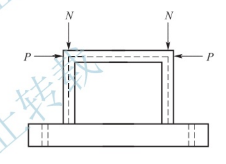


图 2－4　单层单跨钢筋混凝土框架

剪力墙是抗震结构的重要构件，国内外对剪力墙的试验和研究都很重视。剪力墙的试件形式多样，有无框剪力墙、带边框剪力墙，墙体是一块钢筋混凝土平板。带边框剪力墙可分为两种：一种是与框架整体相连的钢筋混凝土板；另一种是在框架内设置钢筋混凝土剪力撑，如图 2－5(a)所示。图 2－5(b)所示则为双肢剪力墙的试件形状。

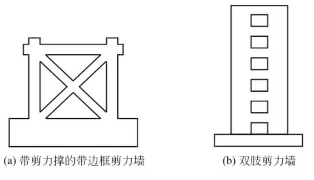
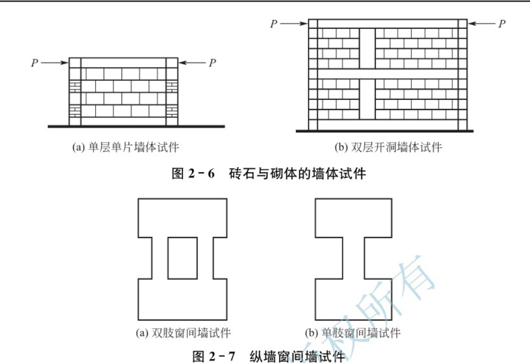


图 2－5　钢筋混凝土剪力墙

在进行砖石与砌块结构的墙体试验时，试件可以采用如图 2－6(a)所示的带翼缘或不带翼的单层单片墙，也可以采用如图 2－6(b)所示的双层单片墙(或开洞)墙体。

对于纵墙，由于外墙有大量窗口，试件可采用有两个或一个窗间墙的双肢或单肢窗间墙试件，如图 2－7 所示。



(a) 单层单片墙体试件　　(b) 双层开洞墙体试件

图 2－6　砖石与砌体的墙体试件

(a) 双肢窗间墙试件　　(b) 单肢窗间墙试件

图 2－7　纵墙窗间墙试件

总之，以上所示的任一种试件的设计，其边界条件的实现与试件安装、加载装置与约束条件等有密切关系，这必须在试验总体设计时进行周密考虑，才能付诸实施。

2.2.2　试件尺寸

结构试验所用的尺寸和大小，总体上分为原型和模型两类。

1. 原型试验

屋架试验一般是采用原型试件(构件实物)或足尺模型，预制构件的鉴定都是选用原型构件，如屋面板、吊车梁等。虽然足尺模型具有反映实际构造的优点，但有些足尺试件能解决的问题(如破坏机制等)，小比例尺试件也同样能解决。若把试验所耗费的经费和人工用来做小比例尺试验，可大大增加试验的数量和品种，况且在实验室内有较好的试验条件提高测试数据的可靠性。

2. 模型试验

基本构件性能研究的试件大部分是采用缩尺模型，即缩小比例的小构件。压弯构件取截面边长 16～35cm，短柱(偏压剪)取截面边长 15～50cm，双向受力构件取截面边长 10～30cm 为宜。

框架试件截面尺寸为原型的 1/4～1/2，其节点为原型比例的 1/3～1。剪力墙尺寸可取为原型的 1/10～1/3。我国昆明、南宁等地先后进行过装配式混凝土和空心混凝土大板结构的足尺房屋试验。

局部性试件尺寸可取为原型的 1/4～1，整体性结构试验的试件可取原型的 1/10～1/2。

砖石及砌块的墙体试件一般取为原型的 1/4～1/2。我国兰州、杭州与上海等地先后做过四幢足尺砖石和砌块多层房屋的试验。

对于薄壳和网架等空间结构，较多采用比例为 1/20～1/5 的模型试验。

试验时要考虑尺寸效应。尺寸效应反映结构试件和材料强度随试件尺寸的改变而变化的性质。试件尺寸越小，表现出相对强度提高越大和强度离散性也越大的特征，所以试件尺寸不能太小。同时小尺寸试件难以满足试件构造上的要求，如钢筋混凝土构件的钢筋搭接长度，节点部位箍筋密集影响混凝土的浇捣，以及钢筋和骨料选材困难等。

对于结构动力试验，试件尺寸常受试验加载条件等因素的限制，动力特性试验可以在现场原型结构上进行。实验室内可以进行吊车梁、屋架等足尺构件的疲劳试验。至于地震模拟振动台加载试验，由于受台面尺寸、振动台的负荷能力、激振力大小等参数的限制，一般只能做缩尺的模型试验。国内在地震模拟振动台上已经完成了一批比例在 1/50～1/4 的结构模型试验。日本为满足原子能反应堆的足尺试验的需要，研制了负载为 1000t，台面尺寸为 15m×15m，竖向、水平双向同时加震的大型模拟地震振动台。

2.2.3　试验数目

在进行试件设计时，除了对试件的形状尺寸应进行仔细研究外，对于试件数目即试验量的设计也是一个不可忽视的重要问题，因为试验量的大小直接关系到能否满足试验的目的、任务以及整个试验的工作量问题，同时也受试验研究、经费和时间的限制。

对于生产性试验，一般按照试验任务的要求有明确的试验对象。对于预制构件的质量检验和评定，按国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB 50204—2002)的规定抽样检验。检查数量时，对于成批生产的构件，应按同一工艺正常生产的不超过 1000 件且不超过 3 个月的同类型产品为一批，当连续检验 10 批且每批结构性能均符合标准规定的要求时，对同一工艺正常生产的构件，可改为不超过 2000 件且不超过 3 个月的同类型产品为一批。在每批中应随机抽取一个构件作为试件进行检验。上述“同类型产品”是指同一钢种、同一混凝土强度等级、同一工艺和同一结构形式的构件。对同类型产品进行抽样检验时，试件宜从设计荷载最大、受力最不利或生产数量最多的构件中抽取。

对于科研性试验，其试验对象是按照研究要求而专门设计的，这类结构的试验往往是属于某一研究专题工作的一部分，特别是对于结构构件基本性能的研究，由于影响构件基本性能的参数较多，所以要根据各参数构成的因子数和水平数来决定试件数目，参数多则试件的数目也自然会增加。

试验数量的设计方法有四种，即优选法、因子法、正交法和均匀法。这四种方法是四门独立的学科，下面仅就其特点做简单描述。

1. 优选设计法

针对不同的试验内容，利用数学原理合理地安排试验点，用步步逼近，层层选优的方式以求迅速找到最佳试验点的试验方法称为优选法。

单因素问题设计方法中的 0.618 法是优选法的典型代表。优选法对单因素问题试验数量设计的优势最为显著，其多因素问题设计方法已被其他方法所代替。

2. 因子设计法

因子是对试验研究内容有影响的发生着变化的因素，因子数则为可变化因素的个数，水平即为因子可改变的试验档次，水平数则为档次数。

因子设计法又称全面试验法或全因子设计法，试验数量等于以水平数为底，以因子数

为次方的幂函数，即

$$试验数=水平数^{因子数}$$

因子设计法试验数的设计值如表 2-1 所示。

表 2-1　用因子法计算试验数量

主要因子＼水平数	2	3	4	5
1	2	3	4	5
2	4	9	16	25
3	8	27	64	125
4	16	81	256	625
5	32	243	1024	3215

由表 2-1 可见，因子数和水平数稍有增加，试件的个数就极大地增多，所以因子设计法在结构试验中不常采用。

3. 正交设计法

在进行钢筋混凝土柱抗剪强度的基本性能试验研究中，以混凝土强度、配筋率、配箍率、轴向应力和剪跨比作为设计因子，如果利用全因子法设计，当每个因子各有 2 个水平数时，试验试件数应为 32 个。当每个因子有 3 个水平数时，则试件的数量将猛增为 243 个，即使混凝土强度等级取一个级别，即采用 C20，视为常数，试验试件数仍需 81 个，这么多的试件实际上是很难做到的。

为此，在试验设计中经常采用一种解决多因素问题的试验设计方法——正交试验设计法，它主要是应用均衡分散、整齐可比的正交理论编制的正交表来进行整体设计和综合比较，科学地解决了各因子和水平数相对结合可能造成的影响，也妥善地解决了试验所需要的试件数与实际可行的试验试件数之间的矛盾，解决了实际所做小量试验与要求全面掌握内在规律之间的矛盾。

现仍以钢筋混凝土柱抗剪强度基本性能研究问题为例，用正交试验法做试件数目设计。如果同前面所述主要影响因素为 5 个，而混凝土只用一种强度等级 C20，这样实际因子数只为 4，若每个因子各有 3 个档次，即水平数为 3，如表 2-2 所示。

表 2-2　钢筋混凝土柱抗剪强度试验分析因子与水平数

主要分析因子＼水平数		1	2	3
A	受拉钢筋配筋率 ρ	0.4	0.8	1.2
B	配箍率 ρ_s	0.2	0.33	0.5
C	轴向应力 $\sigma_c/(N/mm^2)$	20	60	100
D	剪跨比 λ	2	3	4
E	混凝土强度等级 C20	13.5N/mm²		

根据正交表 $L_9(3^4)$，试件主要因子组合如表 2－3 所示。这一问题通过正交设计法进行设计，原来需要 81 个试件的试验可以综合为 9 个试件。

表 2－3　试件主要因子组合

试件数量	A	B	C	D	E
	配筋率	配筋率	轴压应力	剪跨比	混凝土强度
1	0.4	0.20	20	2	C20
2	0.4	0.33	60	3	C20
3	0.4	0.50	100	4	C20
4	0.8	0.20	60	4	C20
5	0.8	0.33	100	2	C20
6	0.8	0.50	20	3	C20
7	1.2	0.20	100	3	C20
8	1.2	0.33	20	4	C20
9	1.2	0.50	60	2	C20

上述例子的特点是，各个因子的水平数均相等，试验数正好等于水平数的平方，即

$$试验数=(水平数)^2$$

当试验对象各个因子的水平数互不相等时，试验数与各个因子的水平数之间存在下面的关系。

$$试验数=(水平数1)^2\times(水平数2)^2\times\cdots$$

正交设计表中多数试验数能够符合这一规律，如正交表 $L_4(2^3)$ 的试验数就等于 $2^2=4$，$L_{16}(4\times2^{12})$ 的试验数就等于 $4^2=16$。

正交表除了 $L_9(3^4)$、$L_4(2^3)$、$L_{16}(4\times2^{12})$ 外，还有 $L_{16}(4^5)$、$L_{16}(4^2\times2^9)$、$L_{16}(4^3\times2^6)$ 等。L 表示正交设计，其他数字的含义用下式表示：

$$L_{试验数}(水平数1^{相应因子数}\times水平数2^{相应因子数})$$

$L_{16}(4^2\times2^9)$ 的含义是某试验对象有 11 个影响因素，其中 4 个水平数的因素有 2 个，2 个水平数的因素有 9 个，其试验数为 16。

试件数量设计是一个多因素问题、在实践中应该使整个试验的数目少而精，以质取胜，切忌盲目追求数量；要使所设计的试件尽可能做到一件多用，即以最少的试件、人力、经费，得到最多的数据；要使通过设计所决定的试件数量和经试验得到的结果能反映试验研究的规律性，满足研究目的的要求。

4. *均匀设计法*

均匀设计法是由我国著名数学家方开泰、王元在 20 世纪 90 年代合作创建的以数理学和统计学为理论基础，以分散均匀为设计原则的全新设计方法，其最大的优势是能以最少的试验数量，获得最理想的试验结果。

利用均匀法进行设计时，一般地，不论设计因子数有多少，试验数与设计因子的最大水平数相等，即

$$试验数=最大水平数$$

设计表用 $U_n(q^s)$ 表示，其中 U 表示均匀设计法，n 表示试验次数，q 表示因子的水平

数，s 表示表格的列数(注意：不是列号)，s 也是设计表中能够容纳的因子数。

根据均匀设计表 $U_6(6^4)$，试件主要因子组合如表 2－4 和表 2－5 所示。

表 2－4　$U_6(6^4)$使用表

s	列号				D
2	1	3	—	—	0.1875
3	1	2	3		0.2656
4	1	2	3	4	0.2990

注：D 值表示刻划均匀的偏差，偏差值越小，表示均匀度越好。

表 2－5　$U_6(6^4)$设计表

列号		1	2	3	4
水平数	1	1	2	3	6
	2	2	4	6	5
	3	3	6	2	4
	4	4	1	5	3
	5	5	3	1	2
	6	6	5	4	1

表 $U_6(6^4)$中，s 可以是 2 或 3 或 4，即因子数可以是 2 或 3 或 4，但最多只能是 4。不难看出，s 越大，均匀设计法的优势越突出。

前述钢筋混凝土柱抗剪强度基本性能研究问题若应用均匀设计法进行设计，原来需要 9 个试件，可以综合为 4 个试件，且水平数由原来的 3 个增加至 6 个。每个设计表都附有一个使用表。试验数据采用回归分析法处理。

2.2.4　试件构造措施设计

在试件设计中，当确定了试件形状、尺寸和数量后，在每一个具体试件的设计和制作过程中，还必须同时考虑安装、加载、测量的需要，在构件上采取必要的措施，这对科学研究尤为重要。例如，混凝土试件的支承点应预埋钢垫板以及在试件承受集中荷载的位置上应设钢板，如图 2－8(a)所示；在屋架试验受集中荷载作用的位置上应预埋钢板，以防

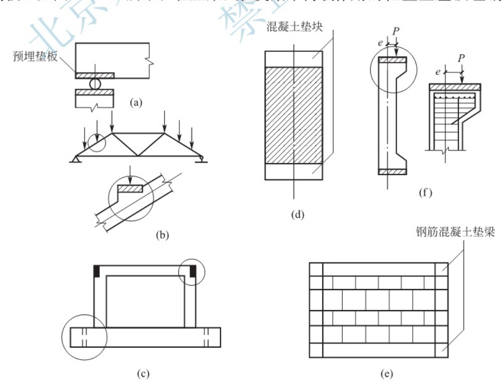


图 2－8　试件设计时考虑加载需要的构造措施

止试件局部承压而破坏。试件加载面倾斜时，应做出凸缘，如图 2－8(b)所示，以保证加载设备的稳定设置。在钢筋混凝土框架试验时，为了框架端部侧面施加反复荷载的需要，应设置预埋构件以便与加载用的液压加载器或测力传感器连接；为保证框架柱脚部分与试验台的固接，一般均设置加大截面的基础梁，如图 2－8(c)所示。在砖石或砌体试件中，为了施加在试件的竖向荷载能均匀传递，一般在砌体试件的上下均应预先浇捣混凝土的垫块，如图 2－8(d)所示。对于墙体试件，在墙体上下均应捣制钢筋混凝土垫梁，其中下面的垫梁可以模拟基础梁，使之与试验台座固定，上面的垫梁模拟过梁传递竖向荷载，如图 2－8(e)所示。在做钢筋混凝土偏心受压构件试验时，在试件两端要做成牛腿以增大端部承压面和便于施加偏心荷载，如图 2－8(f)所示，并在上下端加设分布钢筋网进行加强。这些构造措施是根据不同加载方法而设计的，但在验算这些附加构造的强度时必须保证其强度储备大于结构本身的强度安全储备，这不仅考虑到计算中可能产生的误差，而且还必须保证它不产生过大的变形，以致改变加载点的位置或影响试验精度。当然更不允许因附加构造的先期破坏而妨碍试验的继续进行。

在试验中为了保证结构或构件在预定的部位破坏，以期得到必要的测试数据，就需要对结构或构件的其他部位事先进行局部加固。

为了保证试验量测的可靠性和仪表安装的方便，在试件内必须预设埋件或预留孔洞，如安装杠杆应变仪时，需要配合夹具形状及标距大小预埋螺栓或预留孔洞；用接触式应变仪量测试件表面应变时应埋设相应的测点标脚；钢筋混凝土试件用电阻应变计量测钢筋应变时，在浇注混凝土前应先在钢筋上贴好应变计，做好防潮及防止机械损伤的处理。如混凝土保护层不大，也可在准备贴应变计部位的保护层处预埋小木块，待混凝土凝固后将木块凿去，使钢筋外露，然后再贴上应变计。但这时对钢筋的贴片部位最好能事先打磨，这对于采用螺纹钢筋的结构尤需注意，避免预留孔狭小，在以后的打磨中带来困难。对于为测定混凝土内部应力的预埋元件或专门的混凝土应变计、钢筋应变计等，应在浇筑混凝土前按相应的技术要求用专门的方法就位、固定、安装、埋设在混凝土内部。这些要求都应在试件的施工图上明确标出，并注明具体做法和精度要求，必要时试验人员还需亲临现场参加试件的施工制作。

2.3　试验荷载方案设计

试验荷载方案设计内容主要包括荷载类型的选择、荷载架的选择、结构构件支座设计、荷载图式的选择、加载程序设计、试验装置设计、卸载方案设计等。

2.3.1　荷载设计的一般要求

正确地选择试验所用的荷载设备和加载方法，对顺利地完成试验工作和保证试验的质量有着很大的影响。为此，在选择试验荷载和加载方案时，应满足下列几点要求。

(1) 选用的试验荷载的图式应与结构设计计算的荷载图式所产生的内力值完全一致或极为接近。

(2) 荷载值要准确，特别是静力荷载要不随加载时间、外界环境和结构的变形而

变化。

(3) 荷载传力方式和作用点明确，产生的荷载数值要稳定。

(4) 荷载分级的数值要参考相应结构试验方法的技术要求，同时必须满足试验量测的精度要求。

(5) 加载装置本身要有足够的安全性和可靠性，不仅要满足强度要求，还必须按变形条件来控制加载装置的设计，即必须满足刚度要求，防止对试件产生卸载作用而减轻了结构实际承担的荷载。

(6) 加载设备的操作要方便，便于加载和卸载，既能控制加载速度，又能适应同步加载或先后不同步加载的要求。

(7) 试验加载方法要力求采用现代化先进技术，减轻体力劳动，提高试验质量。

2.3.2 试验加载图式的选择与设计

试验荷载在试验结构构件上的布置(包括荷载类型和分布情况)称为加载图式。在工程结构试验中，试验加载图式要根据试验目的确定。试验时的荷载应该使结构处于某一种实际可能的最不利的工作状态。

试验时，荷载的图式要与结构设计计算的荷载图式一致。例如，在钢筋混凝土楼盖中，支承楼板的次梁的试验荷载应该是均布的；支承次梁的主梁应该是按次梁间距作用的几个集中荷载；而工业厂房的屋面大梁则承受间距为屋面板宽度或檩条间距的等距集中荷载；对于吊车梁则按其抗弯或抗剪最不利时的实际轮压位置布置相应的集中荷载。当一种加载图式不能反映试验要求的几种极限状态时，应采用几种不同的加载图式分别在几个试验结构构件上进行试验。

试验时，也常常采用不同于设计计算所采用的荷载图式，主要原因如下。

(1) 对设计计算时采用的荷载图式的合理性有所怀疑，因而在试验时采用某种更接近于结构实际受力情况的荷载布置方式。

例如，装配式钢筋混凝土的交梁楼面，设计时楼板和次梁均按简支进行计算，然而实际施工时由于整层混凝土一起浇筑使楼面的整体性加强，试验时必须考虑邻近构件对受载部分的影响，即要考虑荷载的横向分布，这时荷载图式就需按实际受力情况做适当变化。

(2) 在不影响结构工作和试验成果分析的前提下，由于受试验条件的限制和为了加载的方便，可以改变加载图式，采用与计算简图等效的荷载图式。

例如，当试验承受均布荷载的梁或屋架时，为了试验方便和减少加载用的荷载量，常用几个集中荷载来代替均布荷载。但是，集中荷载的数量和位置使结构所产生的内力值应尽量与均布荷载所产生的内力值相符合。集中荷载可以很方便地用少数液压加载器或杠杆产生，这样不仅简化了试验装置，还可以大大减轻试验加载的劳动量。采用这样的方法时试验荷载的大小要根据相应等效条件换算得到，因此称为“等效荷载”。

采用等效荷载时，必须全面验算由于荷载图式的改变对结构构件造成的各种影响，必要时应对结构构件做局部加强，或对某些参数进行修正。如当构件满足强度等效，而整体变形(如挠度)条件不等效时，则需对所测变形进行修正。取弯矩等效时，尚需验算

剪力对构件的影响，同时要把采用等效荷载的试验结果所产生的误差控制在试验允许的范围内。

2.3.3　试验加载装置设计

1. 加载装置的设计要求

1）强度要求

对于加载装置的强度，首先要满足试验最大荷载量的要求，保证有足够的安全储备，同时要考虑到结构受载后有可能使局部构件的强度有所提高。

图 2－9 所示的钢筋混凝土框架在柱顶 B 点施加水平力 Q，柱上端施加轴向力 N 时，柱的剪力分别为 Q_{C1} 和 Q_{C2}，则梁 BC 会增加轴向压力 Q_{C2}。当梁的屈服荷载由最大试验荷载决定时，梁所受的轴力使其强度有所提高，使原来按梁上无轴力情况的理论荷载所设计出来的加载装置不能将试件加载到破坏。另外，由于材料的性质及误差，即使设计中考虑了上述增加的轴力的影响，试件的最大强度也常常比预计的大。因此，在试验设计时加载装置的承载能力必须比试验最大荷载值要大，一般要求提高 70％左右。

2）刚度要求

试验加载装置也必须考虑刚度要求。正如混凝土应力-应变曲线下降段测试一样，在结构试验时如果加载装置刚度不足时，将难以获得试件极限荷载后的性能。

3）真实要求

试验加载装置设计要能符合结构构件的受力条件，要求能模拟结构构件的边界条件和变形条件，严防失真。

如钢筋混凝土柱的弯剪试验，若采用图 2－10 所示的加载方法，在轴向力的加力点处会有弯矩产生，形成负面约束，以致其应力状态与设想的有所不同，为了消除柱端约束，在加载点和反力点处均应加设滚轴。

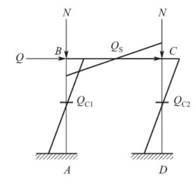


图 2－9　框架试验荷载图式

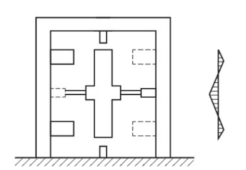
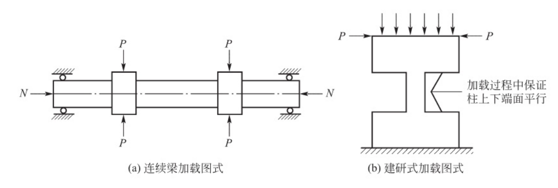


图 2－10　柱弯剪试验装置

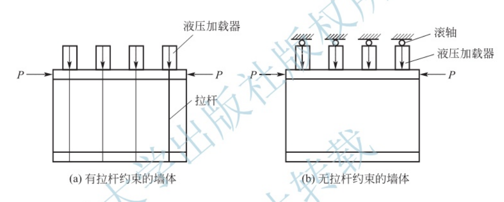
又如图 2－11 所示是两种短柱受水平荷载试验，试验装置可以采用 2－11(a)所示的连续梁式加载，也可以采用图 2－11(b)所示建研式加载装置(日本建设省建筑研究所研制的一种专门进行偏压剪试验的加载装置)。建研式加载方法能保持短柱上下端面在加载过程中平行移动，显然对窗间短柱而言，这种装置更符合受力条件，因为连续梁式加载不能保证受剪的端面平行。



(a) 连续梁加载图式　　(b) 建研式加载图式

图 2-11　偏压剪短柱的试验装置

在砖石或砌块的墙体推压试验中，图 2-12(a)所示的施加竖向荷载用的拉杆对墙体的横向变形产生约束，而图 2-12(b)所示的加载方式就能消除约束，较好地符合实际墙体的受力情况。



(a) 有拉杆约束的墙体　　(b) 无拉杆约束的墙体

图 2-12　墙体推压试验装置

在加载装置中还必须注意试件的支承方式。前述受轴力和水平力作用的柱的试验，两个方向加载设备的约束会引起较为复杂的应力状态。在梁的弯剪试验中，加载点和支承点的摩擦力均会产生次应力，使梁所受的弯矩减小。在梁柱节点试验中，如采用 X 形试件，若加力点和支承点处的摩擦力较大，就会接近于抗压试验的情况。支承点处的滚轴可按接触承压应力进行计算。实际试验时多用细圆钢棒做滚轴，当支承反力较大时，滚轴可能产生变形，甚至接近塑性，此时会产生非常大的摩擦力，导致试验结果出现误差。试验过程中应随时观察，以便及时调整。

4）简便性要求

试验加载装置除了要满足上述要求外，应尽可能地使构造简单，组装时花费时间较少，特别是当要做若干同类型试件的连续试验时，还应考虑能方便安装试件，并缩短其安装调整的时间。如有可能最好设计成多功能的，以满足各种试件试验的要求。

2. 试件的就位形式

1）正位试验

一般的结构试验均采用正位试验，对于梁、板和屋架等简支的静定构件，正位试验时结构构件的受压区在上，受拉区在下，结构自重和它所承受的外荷载作用在同一垂直平面内，符合实际受力状态。因此，在结构试验中应优先采用正位试验。

2）卧位试验

对于自重较大的梁、柱，跨度大、矢高的屋架及桁架等重型构件，当不便于吊装运输和进行测量时，可在现场就地采用卧位试验，这样就能大幅度降低试验装置的高度，便于布置量测仪表和数据测量。现场卧位试验较多采用成对构件试验的方法，即利用局部加强后的另一同类试件作为平衡机构。在采用卧位试验时，为减少构件变形及支承面间的摩擦阻力和自重弯矩，应将试件平卧在滚轴上或平台车上，使其保持水平状态，如图 2-13 所示。

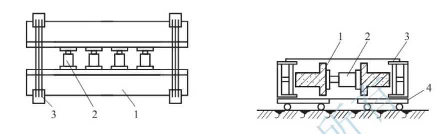


图 2-13　吊车梁成对卧位试验

1—试件；2—千斤顶；3—支承力架；4—滚动平车

3）反位试验

对于混凝土构件进行抗裂或裂缝宽度试验时，为了便于观察裂缝和读取裂缝宽度值，可将试件倒过来安装，使其受拉区向上，这种形式称为反位试验。反位试验可以简化和减少加载装置，但外荷载首先要抵消构件自重。对于自重较大的混凝土构件，在反位试验安装时要特别注意自重反位作用可能引起受压区的开裂。

4）原位试验

对已建结构进行现场试验时，均采用原位试验。试验的构件处于实际工作位置，它的支承情况、边界条件与实际工作状态完全一致。这种构件与单个构件的结构试验不完全一样，如支承不是理想的支座，邻近构件对试件部分产生卸载作用等，在试验设计时应特别引起注意。

2.3.4　试验加载制度的制定

根据国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》（GB 50153—2008）和各种结构设计规范规定，结构的极限状态分为承载力极限状态和正常使用极限状态，还规定结构构件应按不同的荷载效应组合设计值进行承载力计算，以及稳定、变形、抗裂和裂缝宽度验算。因此，在进行结构试验前，首先应确定相应于各种受力状态的试验荷载。当进行承载力极限状态试验时，应确定承载力的试验荷载值。对构件的刚度、裂缝宽度进行试验时，应确定正常使用极限状态的试验荷载值。当试验混凝土的抗裂性时，应确定构件的开裂荷载试验值。

试验加载制度是指试验进行期间荷载与时间的关系。它包括加载速度的快慢、加载时间间歇的长短、分级荷载大小和加载卸载循环的次数等。结构构件的承载力和变形性质与其所受荷载作用的时间特性有关。不同性质的试验必须根据试验的要求制定不同的加载制度。对于结构静力试验，一般采用预加载、设计试验荷载或变形的低周反复加载，而结构

拟动力试验则由计算机控制，按结构受地震地面运动加速度作用后的位移反应时程曲线进行加载试验。一般结构动力试验采用正弦激振试验，而结构抗震的地震模拟振动台则采用模拟地震地面运动加速度地震波的激振试验。

2.4　试验观测方案设计

观测是根据受力结构的变形特征和控制截面上的变形参数来制订的，因此要预先估算出结构在试验荷载作用下的受力性能和可能发生的破坏形状。观测方案的内容主要包括：确定观测项目；选定观测区域及布置测点；按量测项目选择合适的仪表和确定试验观测方法。

2.4.1　观测项目的确定

1. 结构静力试验的观测项目

结构在试验荷载及其他模拟条件下的变形可以分为两类：一类反映结构整体工作状况，如梁的最大挠度及其整体挠曲曲线，拱式结构和框架结构的最大垂直和水平位移及其整体变形曲线，杆塔结构的整体水平位移及基础转角等；另一类反映结构的局部工作状况，如局部纤维变形，裂缝以及局部挤压变形等。

在确定试验的观测项目时，首先应考虑整体变形，因为结构的整体变形最能概括其工作的全貌，结构任何部位的异常变形或局部破坏都能在整体变形中得到反映。如通过一榀屋架的挠度曲线测量，不仅可以知道结构的刚度变化，而且可以知道它的弹性和非弹性性质，其挠度曲线的不正常发展还说明某些特殊的局部现象。对于一般的生产鉴定性试验，只测定最大挠度一项也能做出基本的定量分析。

其次是局部变形测量，如钢筋混凝土结构的裂缝出现直接说明其抗裂性能，而控制截面上的应变大小和方向则可推断截面应力状态，并验证设计是否合理，计算是否正确。在非破坏性试验中，实测应变是推断结构应力状态和极限强度的主要指标。在结构处于弹塑性阶段时，应变、曲率、转角或位移的量测和描绘，也是判定结构工作状态和抗震性能的主要依据。

总的来说，试验本身能充分说明外部作用与结构变形的相互关系，但观测项目和测点布置必须满足分析和推断结构工作状态的需要。

2. 结构拟静力试验和拟动力试验的观测项目

结构拟静力试验是在低周反复荷载作用下模拟地震对结构的作用。它由反映试件变形能力的延性系数的大小和荷载-变形滞回曲线的形状等作为评价和衡量结构抗震性能的指标，而延性系数则由结构的极限变形与屈服变形的比值来决定。所以试验观测项目也是各种变形，如位移、转角、曲率、剪切变形、应变等，它可以是整体变形，也可以是局部变形。具体测量的内容随试件的类型和受力状态而变化，如梁式受弯构件主要量测跨中挠度或梁的曲率；墙体试件主要量测顶部自由端的侧向水平位移或底部固定端的剪切转角；梁柱节点试验可量测梁柱自由端点的位移、连接处的转角、梁的曲率、节点核心区的剪切变

形等。

结构拟动力试验的观测项目与拟静力试验相类似，应量测结构各层的位移和相应的恢复力，由此求得相应的层间恢复力特性曲线。要量测结构的钢筋应变、节点转角和剪切变形，以及钢筋的粘结滑移等，有时还须量测在不同地震加速度作用下结构主要部位位移反应的过程曲线。

3. 结构动力试验和抗震动力试验观测项目

结构动力试验和结构抗震试验观测的项目有反映结构动力特性和结构动力反应的有关参数，如振动频率、振幅、振型、阻尼、加速度和动应变等，这些参数都是时间和空间的函数。结构动力特性主要量测结构的自振频率(周期)、振型和阻尼。结构动力反应测试内容是各种动态参数，如振幅、频率(频谱)、加速度、动应变等，还有结构的振动形态和动力系数。结构抗震试验测试的项目主要是位移、加速度和动应变，由此研究结构的地震作用、层间位移和构件受力情况，评定结构的抗震能力。

2.4.2　测点的选择和布置

用仪器对结构或构件进行内力和变形等参数量测时，测点的选择与布置有以下原则。

1. 结构静载试验布点原则

(1) 在满足试验目的的前提下，测点宜少不宜多，以便使试验工作重点突出。

(2) 测点的位置必须有代表性，便于分析和计算。

(3) 为了保证量测数据的可靠性，应布置一定数量的校核性测点。这是因为在试验过程中，由于偶然因素会有部分仪器或仪表工作不正常或发生故障，影响量测数据的可靠性。因此不仅在需要量测的部位设置测点，也要在已知参数的位置上布置校核性测点，以便于判别量测数据的可靠程度。

(4) 测点的布置对试验工作的进行应该是方便的、安全的。安装在结构上的附着式仪表在达到正常使用荷载的 1.2～1.5 倍时应该拆除，以免结构突然破坏而使仪表受损。为了测读方便、减少观测人员，测点的布置尚宜适当集中，便于一人管理多台仪器。控制部位的测点大都处于有危险的部位，应妥善考虑安全措施，必要时应该选择特殊的仪器仪表或特殊的测定方法来满足量测要求。

2. 结构动载试验布点原则

(1) 结构动载试验布点原则与静力试验一样，将测点布置在要求被测量结构反应的最大部位。当需要量测结构振型或在动力荷载作用下结构的强迫振动形态曲线时，则需要在结构上连续布置一定数量的测点，一般至少要五个测点，由各点动位移的连线求得。由于结构振动有正负方向，因此要注意仪器的相位，并要求各测点仪器必须同步，以确定结构的振型和振动形态位移值的正负。

(2) 地震模拟振动台整体结构模型试验时，为量测试件在地震作用下的加速度反应，一般在结构各楼层的楼面和屋面处布置加速度传感器，并可由此求得该处的地震作用。同样，在各楼面和屋面处量测动位移，可由此测得结构振型和地震作用下的振动曲线，并由各点动位移的时程曲线分析求得结构的频率和阻尼等参数。

2.4.3 仪器的选择与测读

1. 仪器的选择

从观测的角度讲，选择仪器应考虑如下问题。

(1) 选择的仪器仪表必须能满足试验所需的精度与量程要求，能用简单仪器仪表的就不要选择精密的。精密量测仪器的使用要求有比较良好的环境和条件，选用时，既要注意条件，又要避免盲目追求精度。试验中若仪器量程不够，中途调整必然会增大量测误差，应尽量避免。

(2) 现场试验由于仪器所处条件和环境复杂，影响因素较多，电测仪器的适应性就不如机械式仪表。测点较多时，机械式仪表却不如电测仪器灵活、方便，选用时应做具体分析和技术比较。

(3) 试验结构的变形与时间因素有关，测读时间应有一定限制，必须遵守有关试验方法标准的规定，仪器的选择应尽可能测读方便、省时，当试验结构进入弹塑性阶段时，变形增加较快，应尽可能使用自动记录仪表。

(4) 为了避免量测的误差和方便工作，量测仪器的型号、规格应尽可能一致，种类越少越好。有时为了控制试验观测结果的准确性，常在控制测点或校核性测点上同时使用两种类型的仪器，以便比较。

2. 仪器的测读

仪器的测读应按一定的程序进行，具体的测试方法与试验方案、加载程序有密切关系，应当注意以下几点。

(1) 在进行测读时，主要的原则是全部仪器的读数必须同时进行，至少也要基本上同时。只有将同时测得的数据联合起来才能说明结构在某一承载状态下的实际情况。

(2) 测读时间一般选在试验荷载过程中加载间歇的时间内，最好在每次加载完毕后的某一时间(如 5min)开始按程序测读一次；到加下一级荷载前，再观测一次读数。根据试验的需要也可以在加载后立即记取个别重要测点仪器的数据。

(3) 当恒载时间较长，按结构试验的要求，应测取恒载下变形随时间的变化。空载时，也应测取变形随时间的恢复情况。

(4) 每次记录仪器的读数时，应该同时记下周围的温度。

(5) 重要的数据应边做记录，边做初步整理，同时算出每级荷载的读数差，与预计的理论值进行比较。

2.5 材料的力学性能与结构试验的关系概述

2.5.1 材料的力学性能与结构试验关系概述

一个结构或构件的受力和变形特点，除受荷载等外界因素影响外，还取决于组成这个

结构或构件的材料内部抵抗外力的性能。充分了解材料的力学性能，对于在结构试验前或试验过程中正确估计结构的承载能力和实际工作状况，以及在试验后整理试验数据、处理试验结果等工作中都具有非常重要的意义。

在结构试验中按照结构或构件材料性质不同，必须测定相应的一些基本的数据，如混凝土的抗压强度、钢材的屈服强度和抗拉极限强度、砖石砌体的抗压强度等。在科学研究性的试验中为了了解材料的荷载-变形关系及其应力-应变关系，需要测定材料的弹性模量。有时根据试验研究的要求，尚需测定混凝土材料的抗拉强度以及各种材料的应力-应变曲线等有关数据。

测量材料各种力学性能时，应该按照国家标准或行业标准规定的标准试验方法进行，试件的形状、尺寸、加工工艺及试验加载、测量方法等都要符合规定的统一标准。由这种标准试件试验得出相应的强度，称为“强度标准值”，作为比较各种材料性能的相对指标。同时也把测定所得其他数据(如弹性模量)作为用于结构试验资料整理分析或该项试验理论分析的有关参数。

在结构抗震研究中，根据地震作用的特点，在结构上施加周期性反复荷载，结构将进入非线性阶段工作，因此相应的材料试验也需在周期性反复荷载作用下进行，这时钢筋将会出现“包辛格效应”。对于混凝土材料就需要进行应力-应变曲线全过程的测定，特别要测定曲线的下降段部分，还需要研究混凝土的徐变-时间和握裹力-滑移等关系，以便为结构非线性分析提供依据。

2.5.2　材料力学性能试验方法

在结构试验中确定材料力学性能的方法有直接试验法与间接试验法两种。

1. 直接试验法

直接试验法是最普通和最基本的测定方法。它是把材料按规定做成标准试件，然后在试验机上用规定的试验方法进行加载试验来测定。这时要求制作试件的材料应该尽可能与结构试件的工作情况相同。对钢筋混凝土结构来说，应该使它们的材性、级配、龄期、养护条件和加载速度等保持一致。同时必须注意，如果采用的试件尺寸和试验方法有别于标准试件，则应将试验结果按规定换算为标准试件的结果，即对材料的试验结果进行尺寸修正。这种方法对于科学研究性试验是完全可以满足的，就是在制作结构构件的同时，留出足够组数的标准试件，配合试验研究工作的需要，测定材料力学性能的参数。

2. 间接试验法

间接试验法也称为“非破损试验法”或“半破损试验法”。对于已建结构的生产鉴定性试验，由于结构的材料力学性能随时间发生变化，为判断结构目前实际具有的承载能力，在没有同条件试块的情况下，必须通过对结构各部位现有材料的力学性能检测来决定。非破损试验是采用某种专用设备或仪器，直接在结构上测量与材料强度有关的另一物理量，如硬度、回弹值、声波传播速度等，通过理论关系或经验公式间接推算出材料的力学性能。半破损试验是在结构或构件上进行局部微破损或直接取样，推算出材料强度的方法。由间接测定法所得的材料力学性能可直接用于结构构件承载力的鉴定。

材料性能试验的间接测定方法自 20 世纪 50 年代开始就被应用。近年来，由于电子技

术、固体物理学等的发展和应用，已经研制了一批精度足够和性能良好的仪器设备，使非破损试验发展成为一项专门的新型试验技术。本书第 9 章中将做专门介绍。

2.5.3　材料力学性能的试验对强度指标的影响

材料的力学性能指标是由钢材、钢筋和混凝土等各种材料分别制成试样或试块进行结构试验的平均值。但是，由于材质的不均匀性等原因，测定的结果必然会产生较大的波动。尤其当试验方法不妥时，波动值将会更大。

长期以来人们通过生产实践和科学实验发现试验方法对材料强度指标有着一定的影响，特别是试件的形状、尺寸和试验加载速度(应变速率)对试验结果的影响尤为显著。对于同一种材料，仅仅由于试验方法与试验条件的不同，就会得出不同的强度指标。对于混凝土这类非均匀材料，它的强度尚与材料本身的组成(骨料的级配、水灰比等)、制作工艺(搅拌、振捣、成形、养护等)以及周围环境、材料龄期等多种因素有关，在进行材料的力学性能试验时，更需加以注意。下面就混凝土材料的力学性能试验做进一步的说明。

1. 试件尺寸与形状的影响

国际上，测定混凝土材料强度的试件常用立方体和圆柱体两种。按照国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)规定，采用 150mm×150mm×150mm 的立方体试件测定的抗压强度为标准值；$h/a=2$ 的 150mm×150mm×300mm 的棱柱体试件(h 为试件的高度，a 为试件的边长)为测定混凝土轴心抗压强度和弹性模量的标准试件。国外采用圆柱体试件时，试件尺寸为 $h/d=2$ 的 ϕ100mm×200mm 或 ϕ50mm×300mm 的圆柱体(h 为圆柱体高度，d 为圆柱体直径)。

随着材料试件尺寸的缩小，在试验中出现了混凝土强度会系统地稍微有提高的现象。一般情况下，截面较小而高度较低的试件得出的抗压强度偏高，其原因可归结为试验方法和材料本身两个方面的因素。试验方法问题可解释为试验机压板对试件承压面的摩擦力起的箍紧作用，由于受压面积与周长的比值不同而影响程度不一，对小试件的作用比对大试件要大。材料自身的原因是由于内部存在缺陷(裂缝)，表面和内部硬化程度的差异在大小不同的试件中影响不同，随试件尺寸的增大而增加。

采用立方体或棱柱体的优点是制作方便，试件受压面是试件的模板面，平整度易于保证。但浇注时试件的棱角处多由砂浆来填充，因而混凝土拌合物的颗粒分布不及圆柱体试件均匀。由于圆柱体试件无棱角，边界条件的均一性好，所以圆柱体截面应力分布均匀。此外，圆柱体试件外形与钻芯法从结构上钻取的试样一致。但圆柱体试件是立式成型，试件的端面即试验加载的受压面比较粗糙，因此造成试件抗压强度的离散性较大。

2. 试验加载速度的影响

在测定材料力学性能试验时，加载速度(应变速率)越大，引起材料的应变速率越高，试件的强度和弹性模量也就相应提高。

钢筋的强度随加载速度的提高而加大。图 2-14(a)是国外所做的软钢试验，图中的 $\dot{\varepsilon}$ 表示应变速率；图 2-14(b)是国内所做的试验结果，图中 t_s 表示达到屈服的时间，反映了加载速度。显然，加荷速度和应变速率对强度是有影响的，但加荷速度基本上不改变弹性模量和图形的形状。

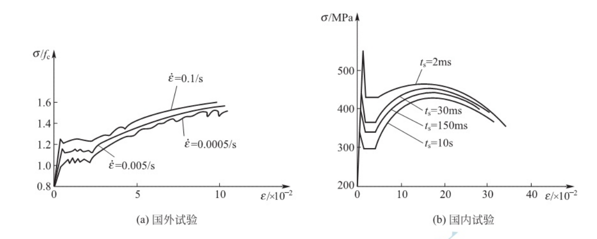


图 2-14　钢筋在不同应变速率下的应力-应变关系

在打桩、爆炸等一类冲击荷载作用下，钢筋可以直接受到高速增加的荷载；但在地震力作用下，钢筋的应变速率取决于构件的状态。以钢筋混凝土框架而言，钢筋应变速率大致在 0.01/s～0.02/s。

尽管混凝土是非金属材料，但也和钢筋一样，随着加载速度的增加，其强度和弹性模量也有所提高。应变速率很高时，由于混凝土内部细微裂缝来不及发展，初始弹性模量随应变速率加快而提高。图 2-15 表示了变形速率对混凝土应力-应变曲线的影响。一般认为试件开始加载并在不超过破坏强度值的 50%内，可以用任意速度进行，而不会影响最后的强度指标。

从图 2-16 可以看到，应力-应变曲线的上升段(从原点到曲线顶点的一段)随应变速率变化的波动远比下降段(顶点以后的一段)小得多。因此，在做常规的静力应力-应变曲线时，不大的应变速率变化对下降段显示出较大的影响。

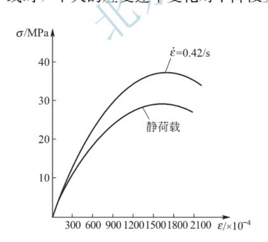


图 2-15　不同应变速率的混凝土应力-应变曲线

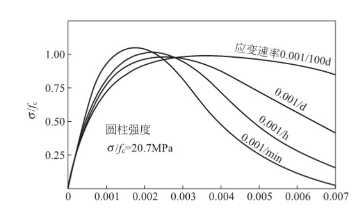


图 2-16　应变速率对混凝土应力-应变曲线下降段的影响

实际混凝土抗压试件试验中，当加载速率使截面应力变化从 0.25MPa/s 提高到 7MPa/s 时，抗压强度指标可增长 9%；当从 0.25MPa/s 的应力降低到 0.007MPa/s 时，则强度将降低 10%～15%。

2.6　试验大纲和试验报告

2.6.1　结构试验大纲

结构试验设计的最终结果要求拟订一个试验大纲，并汇总所有设计的有关资料和文件。试验大纲是进行整个试验工作的指导性文件，它的内容的详细程度视不同性质的试验而定，一般应包括以下各方面的内容。

(1) 试验目的(即通过试验最后应得出的数据，如破坏荷载、设计荷载下的内力分布和挠度曲线，荷载-变形曲线等)。

(2) 试验设计与制作要求(试件设计的依据及理论分析，试件数量及施工图，对试件原材料、制作工艺和精度等的要求)。

(3) 辅助试验内容(辅助试验的目的、试件种类、数量和尺寸、试件制作要求、试验方法等)。

(4) 试件的安装与就位(试件的支座装置、保证侧向稳定的装置等)。

(5) 加载方法(荷载数量及种类、加载设备、加载装置、加载图式和加载程序等)。

(6) 量测方法(测点布置、仪器型号、仪表标定方法、测点布置与编号、仪表安装方法和量测程序)。

(7) 试验过程的观察方案(试验过程中除仪表读取外在其他方面应做的记录)。

(8) 安全措施(安全装置、脚手架、技术安装规定等)。

(9) 试验进度计划。

(10) 经费使用计划(试验经费的预算计划)。

(11) 附件(经费、器材及仪器设备清单等)。

2.6.2　试验的基本文件

除试验大纲外，每一结构试验应包括以下各个文件。

(1) 试件施工图及制作要求说明书。

(2) 试件制作过程及原始数据记录。

(3) 自制试验设备加工图样及设计资料。

(4) 加载装置及仪表编号布置图。

(5) 仪表读取记录表。

(6) 量测过程记录(包括照片、测绘图及试验过程的录像等)。

(7) 试件材料及原材料性能的测定。

(8) 试验数据的整理分析及试验结果总结，包括整理分析所依据的计算公式，整理后的数据图表等。

(9) 试验工作日志。

2.6.3　试验报告

试验报告是全部试验工作的集中反映，编写应力求精简扼要，试验报告有时可不单独编写，而作为研究报告中的一部分。试验报告一般包括以下内容。

（1）试验目的。

（2）试验对象的简介和考察。

（3）试验方法及依据。

（4）试验情况及问题。

（5）试验成果处理与分析。

（6）技术结论。

（7）附录。

试验大纲和试验文件都是原始资料，在试验工作结束后均应整理并装订成册，归档保存。

本 章 小 结

本章系统地介绍了土木工程结构试验前期各项准备工作的技术要求，包括试件设计、荷载设计、观测设计、材料的力学性能试验以及结构试验大纲和试验基本文件的编制等基本内容。学习本章后，应重点掌握试件的形状、尺寸与试件数量设计的基本要求；重点掌握结构试验荷载的加载图式、加载方案的设计原理和方法；能够正确确定观测项目，合理选择观测仪器；并对材料的力学性能以及结构试验大纲的编制有一定的了解。

思　考　题

1. 结构试验包括哪些主要环节？

2. 简述试件数量设计的原则和方法。

3. 在结构试验的测试方案设计中，主要应考虑哪些内容？

4. 荷载设计的内容有哪些？

5. 简述结构试验大纲所包含的内容。

6. 某试验拟用 3 个集中荷载代替简支梁设计承受的均布荷载，试确定集中荷载的大小及作用点，画出等效内力图($P=qL/3$，两侧加载点距支座 $L/8$)。

第3章　结构试验的荷载与加载设备

教学目标

掌握实验室和现场结构试验常用的各种加载方法，以及加载装置、试验设备和支承装置的使用；重点掌握液压加载方法，理解电液伺服加载原理与方法，着重掌握各种加载方法的作用方式、工作特点和要求，以及各种加载方法的适用范围等，并能在结构试验设计中选择和设计加载方案。

教学要求

知识要点	能力要求	相关知识
结构试验加载方法	（1）掌握重物加载法、机械力加载法、气压加载法、液压加载法、惯性力加载法、电磁加载法、现场激振方法以及相应的加载设备 （2）了解各种加载设备的性能特点和各种加载设备的基本结构	荷载模拟 液压加载
荷载支承设备和试验台座	（1）掌握支座、支墩的设计与设置要求 （2）掌握加荷架的设置要求与试验台座的种类	

引言

进行土木工程结构试验时应在试验结构上再现要求的荷载，即试验荷载。试验荷载绝大多数是模拟荷载，而产生这些模拟荷载的方法很多，一般都通过加载设备和试验装置实现。加载的设备有哪些？加载设备的性能特点如何？如何正确地选择试验装置？这些都是决定结构试验成败的关键。本章将介绍常用的加载设备和试验装置。

3.1　荷载与加载设备概述

作用于工程结构上的荷载种类繁多。就直接作用而言，有结构的自重；建筑物楼(屋)面的活荷载、雪荷载、灰载、施工荷载；作用于工业厂房上的吊车荷载、机械设备的振动荷载；作用于桥梁上的车辆振动荷载；作用于海洋平台上的海浪冲击荷载等；在特殊情况

下，还有地震、爆炸等荷载。除了直接作用，一般情况下还有温度变化、地基不均匀沉降、结构内部物理或化学作用等间接作用。

以上荷载按其作用的范围分，有分布荷载和集中荷载；按作用的时间长短分，有短期荷载和长期荷载；按荷载对结构的动力效应分，有静力荷载和动力荷载等。

结构试验除极少数是在实际荷载下实测外，绝大多数是在模拟荷载条件下进行的。结构试验的荷载模拟即是通过一定的设备与仪器，以最接近真实的模拟荷载再现各种荷载对结构的作用。荷载模拟技术是结构试验最基本的技术之一。

在具体的工程结构试验中，决定加载技术时，应根据试件的结构特点、试验目的、实验室设备和现场具备的条件以及经费开支等综合考虑。正确合理的荷载设计是整个试验工作的重要环节之一。

结构试验中荷载的模拟方法、加载设备有很多种，如静力试验有利用重物直接加载法、通过重物和杠杆作用的间接加载的重力加载法；利用液压加载器(千斤顶)、液压加载系统(液压试验机、大型结构试验机)的液压加载法；利用吊链、卷扬机、绞车、花篮螺栓、螺旋千斤顶和弹簧的机械加载法，以及利用气体压力的气压加载法。在动力试验中一般利用惯性力或电磁系统激振，比较先进的设备是由自动控制、液压和计算机系统相结合组成的电液伺服加载系统和由此作为振源的地震模拟振动台加载等设备，此外还有人工爆炸和利用环境随机激振(脉动法)等方法。

在选择加载方法和加载设备时，应满足下列基本要求。

(1) 荷载值准确稳定且符合实际荷载作用模式及传递模式，产生的内力或在要分析部位产生的内力与设计计算等效。

(2) 荷载易于控制，能够按照设计要求的精度逐级加载和卸载。

(3) 加载设备本身应具有足够的承载力、刚度，确保加载和卸载安全可靠。

(4) 加载设备不应参与试验结构或构件的工作，不影响结构自由变形，不影响试验结构受力。

(5) 试验加载方法力求采用先进技术，减少人为误差，提高工作效率。

3.2　重物加载法

重力荷载是利用重物本身的重量施加在结构上作为模拟荷载。常用的重物有铁块、混凝土块、砖、水、沙石，甚至废构件钢锭等。重物可以直接加在试验结构上，也可以通过杠杆系统间接加在试件上。重物加载的优点是荷载值稳定，不会因结构的变形而减少，而且不影响结构的自由变形，特别适用于长期荷载和均布荷载试验。

3.2.1　重物直接加载法

重物可以有规则地放置于结构上，作为均布荷载，如图 3－1 所示，也可以通过荷载盘、箱子、纤维袋等加集中荷载，如图 3－2 所示，此时，吊杆与荷载盘的自重应计入第一级荷载。借助钢索和滑轮导向，可对结构施加水平荷载，如图 3－3 所示。

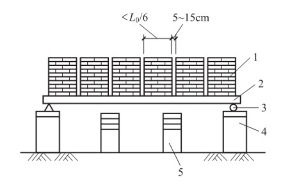


图 3-1　重物对板加均布荷载

1—重物；2—试验板；3—支座；
4—支墩；5—保护垫块

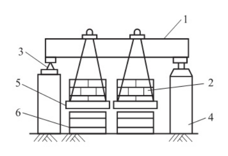


图 3-2　用重物加垂直集中荷载

1—试件；2—重物；3—支座；
4—支墩；5—荷载盘；6—垫块

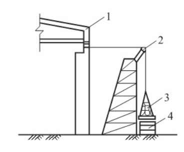


图 3-3　用重物加水平集中荷载

1—试件；2—滑轮；3—重物；
4—垫块

重物加载应注意以下几个问题。当采用铸铁砝码、砖块、袋装水泥等做均布荷载时应分垛堆放，垛间保持 5～15cm 的间隙(图 3-1)，垛宽应小于计算跨度的 1/6。当采用砂、石等松散颗粒材料作为均布荷载时，切勿连续松散堆放，宜采用袋装堆放，以防止砂石材料摩擦角引起拱作用而产生卸载影响，以及砂石重量随环境湿度不同而引起的含水率变化而造成荷载不稳定。散粒状重物应装成袋或装入放在试件上面不带底的箱子中，箱子沿试件跨度方向不得少于两个，箱子间距不小于 25cm，避免荷载起拱而影响结构工作。吸水性大的重物必须干燥，保持恒重，使用中应有防雨措施。

利用水做均布荷载试验，如图 3-4 所示是一种简易方便而且又十分经济的加载方法。加载时可直接用自来水管放水，水的比重为 1，从标尺上的水深就可知道荷载值的大小，卸载也方便，可采用虹吸管原理放水卸载，特别适用于网架结构和平板结构加载试验。缺点是全部承载面被水掩盖，不利于布置仪表和观测。当结构产生较大变形时，要注意水荷载的不均匀性所产生的影响。

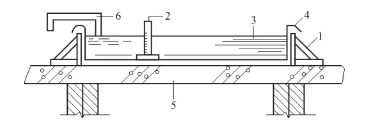


图 3-4　用水做均布荷载的装置

1—侧向支撑；2—标尺；3—水；4—防水胶布或塑料布；5—试件；6—水管

对于桥梁结构静载试验，常以载重汽车装载混凝土块或沙石料等组成重力荷载系统。

3.2.2　重物杠杆加载法

利用重物加载往往会受到荷载量级的限制，此时可利用杠杆原理将荷重放大作用于结构上。杠杆制作方便，荷载值稳定不变。当结构有变形时，荷载可以保持恒定，对于做持

久荷载试验尤为适合。杠杆加载的装置根据实验室或现场试验条件的不同，有图 3－5 所示几种方案。根据试验需要，当荷载不大时，可以用单梁式或组合式杠杆；荷载较大时，则可采用桁架式杠杆。

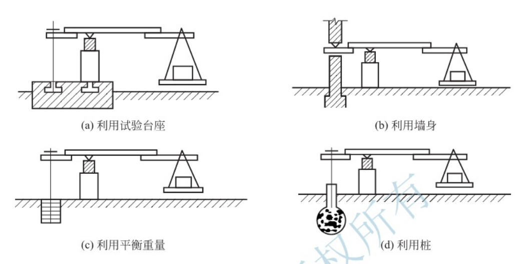


图 3－5　杠杆加载装置

利用杠杆加载比单纯重物加载省工省时，但杠杆应有足够刚度，杠杆比一般不宜大于 5。三个支点应在同一直线上，避免杠杆放大比例失真，保证荷载稳定、准确。现场试验，杠杆反力支点可用重物、桩基础、墙洞等支承，如图 3－5 所示。

为了方便加载和分组，并尽可能减小加载时的冲击力，重物的块(件)重一般不宜大于 25kg，并不超过加载面积上荷载标准值的 1/10，保证分组精度及均匀分布。随机抽取 20 块检查，若每块误差不超过平均重的±5%时，荷载值可按平均重计算。

重力加载方法的优点是设备简单、取材方便、荷载恒定；缺点是荷载量不能很大，操作笨重。当进行破坏试验时，因不能自动卸载，应特别注意安全，一般应在试件底部或荷载盘底下，加可调节的托架或垫块，并随时与试件或盘底保持 50mm 左右的间隙，以备破坏时托住试件，防止其突然倒塌造成事故。

3.3　机械力加载法

机械力加载是利用各种机械施加作用力的一种方法。机械加载常用的机具有吊链、卷扬机、绞车、花篮螺栓、螺旋千斤顶及弹簧等。吊链、卷扬机、绞车、花篮螺栓等配合钢丝或绳索对结构施加拉力，还可以与滑轮组联合使用改变力的作用方向和大小。拉力的大小通常由拉力测力计测定，根据测力计的量程有两种安装方式：当测力计量程大于最大加载值时，用图 3－6(a)所示串联方式，直接测量绳索

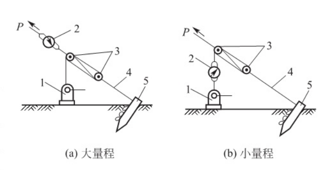


图 3－6　拉力测力装置

1—绞车或卷扬机；2—测力计；3—滑轮；4—钢索；5—桩头

拉力；当测力计量程小于最大加载值时，需要用图 3-6(b)所示的安装方式，此时作用在结构上的实际拉力应为

$$P=\phi \cdot n \cdot K \cdot p \tag{3-1}$$

式中 p——拉力测力计读数；

ϕ——滑轮摩擦系数(对涂有良好润滑剂的可取 0.96～0.98)；

n——滑轮组的滑轮数；

K——滑轮组的机械效率。

螺旋千斤顶是利用齿轮及螺杆式蜗杆机构传动的原理，当摇动千斤顶手柄时，蜗杆就带动螺旋杆顶升，对结构施加顶推压力，加载值的大小可用测力计测定。

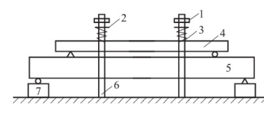


图 3-7 弹簧加载装置

1—螺母；2—衡量；3—弹簧；4—分配梁；5—试件；6—螺杆；7—支墩

弹簧加载法常用于结构的持久荷载试验。图 3-7 所示为弹簧施加荷载进行梁持久试验的加载示意图。加力可直接旋紧螺母，当荷载较大时，先用千斤顶压缩弹簧后再旋紧螺母。弹簧变形与压力值的关系预先测定，试验时测量弹簧变形便可知道作用力。结构变形会自动卸载，卸载超出允许范围时应及时补充。

现场试验时，使用倒链进行加载，简捷方便，能够改变荷载方向，空间布置相对比较灵活。

机械力加载的优点是设备简单，容易实现。当通过索具加载时，很容易改变荷载作用方向。故在建筑物、柔性构筑物(如塔架等)的实测或大尺寸模型试验中，常用此法施加水平集中荷载。其缺点是荷载值不大，当结构在荷载作用点产生变形时，会引起荷载值的改变。

3.4 气压加载法

利用气体压力对结构加载称为气压加载。气压加载有两种，利用压缩空气加载和利用抽真空产生负压对结构加载。气压加载的特点是产生的是均布荷载，对于平板、壳体、球体试验尤为适合。

3.4.1 气压正压加载

空气压缩机对气包充气，给试件施加均匀荷载，如图 3-8(a)所示。为了提高气包耐压能力，四周可加边框。这样最大压力可达 180kN/m^2。压力用不低于 1.5 级的压力表量测。此法较适用于板、壳试验，但当试件为脆性破坏时，气包可能发生爆炸，要加强安全防范。有效办法之一是监视位移计示值不停地急剧增加时，立即打开泄气阀卸载；有效办法之二是试件上方架设承托架，承力架与承托架间用垫块调节，随时使垫块与承力架横梁保持微小间隙，以备试件破坏时搁住，不致因气包卸载而引起爆炸。

压缩空气加载的优点是加载、卸载方便，压力稳定；缺点是结构的受载截面被压住无

法布设仪表观测。

3.4.2　真空负压加载

用真空泵抽出试件与台座围成的封闭空间的空气，形成大气压力差对试件施加均匀荷载，如图 3-8(b)所示。最大压力可达 80～100kN/m^2。压力值用真空表(计)量测。保持恒载由封闭空间与外界相连通的短管与调节阀控制。试件与围壁间缝隙可用薄钢板、橡胶带粘贴密封。试件表面必要时可刷薄层石蜡，这样既可堵住试体微孔，防止漏气，又能突出裂缝出现后的光线反差，用照相机可明显地拍下照片。此法安全可靠，试件表面又无加载设备，便于观测，特别适用于不能从板顶面加载的板或斜面、曲面的板壳等加垂直均匀荷载。这种方法在模型试验中应用较多。

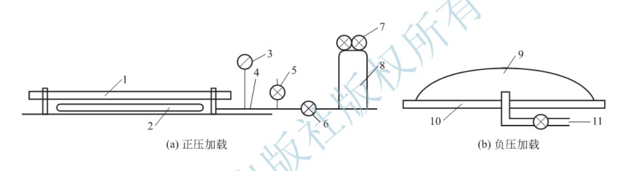


图 3-8　气压加载示意图

1—板试件；2—气囊；3—压力表(或用 U 形管量测)；4—管道；5—泄气针阀；6—进气针阀；7—减压阀；8—空气压缩机；9—试验壳体；10—支承板；11—接真空泵

气压加载试验的关键在于管线和气室的密封情况良好，基础要有足够的强度，板壳四周的支承要满足位移边界条件。试验时如果温度发生变化会造成荷载不稳定，则需要增加恒压控制回路，使气体压力保持在允许的控制范围内。

3.5　液压加载法

液压加载一般为油压加载，这是目前结构试验中普遍应用且比较理想的一种加载方式。它的最大优点是利用油压使液压加载器(千斤顶)产生较大的荷载，试验操作安全方便，无需大量的搬运工作，特别是对于要求荷载点数多，吨位大的大型结构试验更为合适。尤其是电液伺服液压加载系统在试验加载设备中得到广泛应用，为结构动力试验模拟地震荷载、海浪波等不同特性的动力荷载创造了有利条件，应用到结构的拟静力、拟动力和结构动力加载中，使动力加载技术发展到一个新的水平。

3.5.1　液压加载器

液压加载器俗称千斤顶，是液压加载设备中的一个主要部件。其主要工作原理是用高压油泵将具有一定压力的液压油压入液压加载器的工作油缸，使之推动活塞对结构施加荷

载。荷载值可以用油压表示值和加载器活塞受压底面积求得，用这种方法得到的荷载值较粗；也可以用液压加载器与荷载承力架之间所置的测力计直接测读。现在常用的方法是用传感器将信号输送给电子秤或应变仪显示或由记录器直接记录。

根据不同的结构和功能，液压加载器分为液压千斤顶、单向作用液压加载器、双向作用液压加载器和电液伺服作动器。

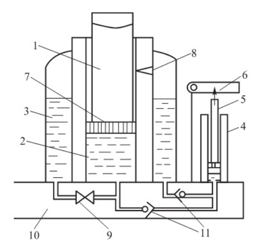


图 3-9　手动液压千斤顶

1—工作活塞；2—工作油缸；3—储油箱；4—油泵油缸；5—油泵活塞；6—手柄；7—油封；8—安全阀；9—泄油阀；10—底座；11—单向阀

1. 手动液压千斤顶

手动液压千斤顶主要包括手动油泵和液压加载器两部分，其构造原理如图 3-9 所示。当手柄 6 上提带动油泵活塞 5 向上运动时，油液从储油箱 3 经单向阀 11 被抽到油泵油缸 4 中，当手柄 6 下压带动油泵活塞 5 向下运动时，油泵油缸 4 中的油经单向阀 11 被压出到工作油缸 2 内。手柄不断地上下运动，油被不断地压入工作油缸，从而使工作活塞不断上升。如果工作活塞运动受阻，则油压作用力将反作用于底座 10。试验时千斤顶底座放在加载点上，从而使结构受载。卸载时只需打开阀门 9，使油从工作油箱 2 流回储油箱 3 即可。

2. 单向作用液压加载器

单向作用液压加载器是为了满足结构试验中同步液压加载的需要而专门设计的加载设备，工作原理如图 3-10(a)所示。它的特点是储油缸、油泵、阀门等是独立的，不附在加载器上，所以其构造比较简单，只由活塞和工作油缸两者组成。其活塞行程较大，顶端装有球铰，可在 15°范围内转动，整个加载器可按结构试验需要做倒置、平置、竖置安装，并适宜将多个加载器组成同步加载系统使用，能满足多点加载的要求。

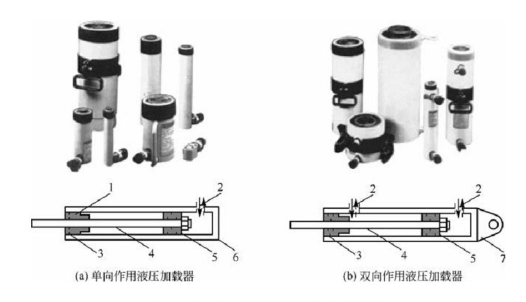


图 3-10　单、双向作用液压加载器图

1—端盖；2—进油出油口；3—油封装置；4—活塞杆；5—活塞；6—工作油缸；7—固定环

3. 双向作用液压加载器

双向作用液压加载器为适应结构低周反复荷载的需要，采用了一种能双向作用的液压加载器，其工作原理如图 3－10(b)所示。它的特点是在油缸的两端各有一个进油孔，设置油管接头，可通过油泵与换向阀交替进行供油，使活塞对结构产生拉或压的双向作用，从而对试验结构施加反复荷载。

4. 电液伺服作动器

电液伺服作动器是专门用于电液伺服系统的加载器，这种加载器也分为单作用和双作用两种，双作用作动器又分为单出杆式和双出杆式两种。单出杆式如图 3－10(b)所示，由于前后两个油腔的活塞工作面积不同，油压相同时作动器产生的推、拉力并不相同；双出杆式如图 3－11 所示，前后两个油腔的活塞工作面积相同，因此，施加的最大推力和拉力相同。电液伺服加载器的制作工艺与双作用千斤顶不同，电液伺服加载器的活塞与油缸之间的摩擦力小，工作频率高，频响范围宽，可施加动力荷载。为了满足控制要求，油缸上装有位移传感器、荷载传感器及电液伺服阀等。电液伺服作动器是电液伺服振动台的起振器，多个电液伺服加载器可构成多通道加载系统，可完成静力试验、拟动力试验、疲劳试验及动力试验等结构试验。

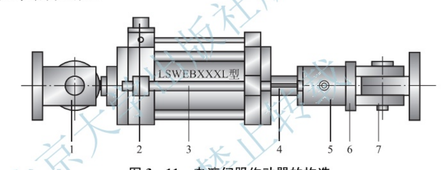


图 3－11　电液伺服作动器的构造

1—铰支基座；2—位移传感器；3—电液伺服阀；4—活塞杆；
5—荷载传感器；6—螺旋垫圈；7—铰支接头

3.5.2　静力试验液压加载装置的工作原理

静力试验液压加载用千斤顶可分为手动液压千斤顶和电动液压千斤顶。手动液压千斤顶工作时，油的工作压力由人力产生，工作系统由手动油泵、液压千斤顶、油路及压力表等组成。工作系统可以制作成一体式或分体式。一体式将液压千斤顶、手动油泵和油路连接在一起，制作成一个整体设备，如图 3－9 所示；分体式千斤顶的手动油泵和油路是分开的，工作时通过油管将千斤顶和手动油泵的供油孔连接起来，工作完成后可以拆卸，如图 3－12 所示。手动液压千斤顶工作时，先关闭回油阀，摇动手动油泵的手柄，驱使储油箱中的液压油通过单

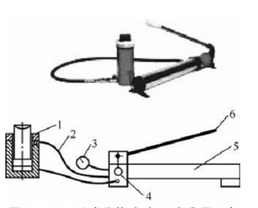


图 3－12　手动分体式液压千斤顶示意

1—千斤顶；2—油管；3—压力表；
4—换向阀；5—手动泵；6—摇臂

向阀进入工作油缸，推动活塞外伸对结构施加作用力。卸载时，打开回油阀，在外力作用下使工作油缸中的油流回储油箱，活塞回缩卸载。

手动液压加载装置轻便，适合人工搬运，便于现场或高空作业，适用于单点加载或通过分配梁进行多点加载，但手动液压加载装置需要人力驱动油源，加载能力不宜太大，一般不超过1000kN。

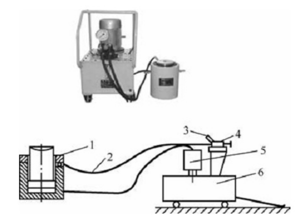


图3-13　电动式液压千斤顶示意

1—千斤顶；2—油管；3—压力表；4—调节阀；5—电动泵；6—油箱

电动液压加载装置的构成与手动分体式加载装置类似，手动油泵被电动油泵取代，由电动机提供能源，组成电动液压加载装置。千斤顶可采用单作用式或双作用式，加载原理如图3-13所示。使用时，启动电动机使油泵工作，缓慢调节调压阀增加压力，直至压力表达到指定压力。电动液压加载装置操作简便，加载能力强，普通液压加载千斤顶加载能力可达10000kN以上，系统最大工作压强可达60～80MPa。一台油泵通过油路分配装置可与多个千斤顶连接，实现多点同步加载。

3.5.3　大型结构试验机加载设备和技术

大型结构试验机本身就是一个比较完善的液压加载系统，是结构实验室内进行大型结构试验的专门设备，比较典型的试验机有结构长柱试验机和结构疲劳试验机等。

1. 结构长柱试验机

结构长柱试验机主要用于进行柱、墙板、砌体、节点与梁的受压与受弯试验。这种设备的构造和原理与一般材料试验机相同，由液压操纵台、大吨位的液压加载器和试验机等三部分组成如图3-14所示。由于进行大型构件试验的需要，它的液压加载器的吨位要比



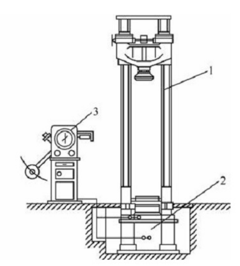


图3-14　结构长柱试验机

1—试验机架；2—液压加载器；3—液压操纵台

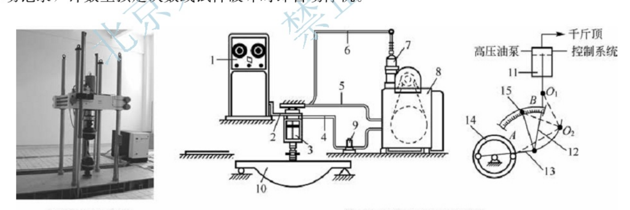
材料试验机的吨位大，一般至少在 2000kN 以上，机架高度在 3m 左右或更高。目前国内普遍使用的长柱试验机的最大吨位是 5000kN，最大高度可为 4m，国外有高达 7m、最大荷载达 10000kN 甚至更大的结构试验机。

日本最大的大型结构构件万能试验机的最大压缩荷载为 30000kN，同时可以对构件进行抗拉试验，最大抗拉荷载为 10000kN，试验机高度达 22.5m，四根工作立柱间净空为 3m×3m，可进行高度为 15m 左右构件的受压试验、最大跨度为 30m 构件的弯曲试验，最大弯曲荷载为 12000kN。这类大型结构试验机还可以通过专用的中间接口与计算机相连，由程序控制自动操作。此外还配以专门的数据采集和数据处理设备，试验机的操纵和数据处理能同时进行，其智能化程度较高。

2. 结构疲劳试验机

工程结构如承受吊车荷载作用的吊车梁、直接承受悬挂吊车作用的屋架和铁路桥梁等，其荷载作用具有重复性质，这些结构在重复荷载的作用下达到破坏时的应力比其静力强度要低得多，这种现象称为疲劳。通过试验研究结构在重复荷载作用下的性能及其变化规律具有重要的工程意义。

结构疲劳试验一般均在专门的疲劳试验机上进行，如图 3-15(a)所示。结构疲劳试验机可做正弦波形荷载的疲劳试验，也可做静载试验和长期荷载试验等。结构疲劳试验机主要由脉动发生系统(高压油泵)、控制系统和千斤顶工作系统三部分组成。脉动工作原理如图 3-15(b)所示，从高压油泵打出的高压油经脉动器再与工作千斤顶和装于控制系统中的油压表连通，使脉动器、千斤顶、油压表都充满压力油。当飞轮带动曲柄运动时，就使脉动器活塞上下移动而产生脉动油压。脉动频率通过电磁无级调速电机控制飞轮转速并进行调整。国产 PME-50A 疲劳试验机，试验频率为 100～500 次/min。疲劳次数由计数器自动记录，计数至预定次数或试件破坏时即自动停机。



(a) 结构疲劳试验　　(b) 疲劳试验机脉动工作原理

图 3-15　结构疲劳试验机

1—控制系统；2—校准管；3—脉动千斤顶；4—回油管；5—喷油管；6—输油管；7—分油头；8—脉动发生系统；9—卸油泵；10—吊车梁；11—脉动器；12—顶杆；13—曲柄；14—飞轮；15—脉动调节器

应注意的是，在进行疲劳试验时，由于加载器运动部件的惯性力和试件质量的影响，会产生一个附加作用力作用在构件上。该值在测力仪表中未测出，故实际荷载值需按机器说明加以修正。

3.5.4　电液伺服液压系统

电液伺服液压系统是一种闭环控制加载系统，早在20世纪50年代开始首先应用于材料试验，它的出现是材料试验技术领域的一个重大进展。由于它可以较为精确地模拟试件所受的实际外力，产生真实的试验状态，所以在近代试验加载技术中又被人们引入到结构试验的领域中，用以模拟并产生各种振动荷载，特别是地震、海浪等荷载对结构物的影响，对结构构件的实物或模型进行加载试验，以研究结构的强度及变形特性。它是目前结构试验研究中一种比较理想的试验设备，特别是用于进行抗震结构的静力或动力试验尤为适宜，所以越来越受到人们的重视，同时被广泛应用。

电液伺服液压加载系统大多采用闭环控制，主要组成由电液伺服液压加载器、控制系统和液压源三大部分组成，如图3－16所示。它可将荷载、应变、位移等物理量直接作为控制参数，实行自动控制。

图3－16左侧为液压源部分，右侧为控制系统，中间为带有电液伺服阀的液压加载器。高压油从液压源的油泵3输出经过滤器进入伺服阀4，然后输入到双向加载器5的左右室内，对试件6施加试验所需要的荷载。根据不同的控制类型，反馈信号由荷重传感器7(荷载控制)、试件上的位移传感器8(位移控制)或应变计9(应变控制)测得。测得的信号分别经过与之相适应的调节器10、11、12放大，输出各控制变量的反馈值。反馈值可在记录及显示装置13上反映。指令发生器14根据试验要求发出指令信号。该指令信号与反馈信号在伺服控制器15中进行比较，其差值即为误差信号，经放大后反馈，用于控制电液伺服阀4操纵液压加载器5活塞的工作，从而完成了全系统的闭环控制，如图3－16所示。

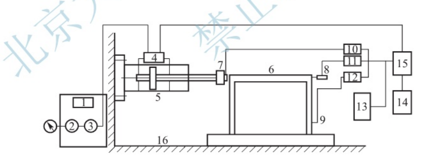


图3－16　电液伺服液压系统工作原理

1—冷却器；2—电动机；3—高压油泵；4—电液伺服阀；5—液压加载器；
6—试验结构；7—荷重传感器；8—位移传感器；9—应变传感器；10—荷载调节器；
11—位移调节器；12—应变调节器；13—记录及显示装置；14—指令发生器；
15—伺服控制器；16—试验台座

电液伺服阀是将电信号转化为液压信号的高精密元件。模拟控制器将位移、力等控制信号首先转换成电信号传输给电液伺服阀，电液伺服阀根据电信号控制作动器产生运动，完成对试件推、拉等加载过程。模拟控制器由测量反馈器、运算器、D/A转换器等构成，是向电液伺服阀发出命令信号的电子部件。工作时完成波形产生、运算、信号转换(A/D、D/A转换)、输出、反馈调节等一系列复杂过程，指挥电液伺服作动器，完成期望的试验

加载过程。

电液伺服系统采用的是闭环控制加载方式，通过力、应变、位移等物理参数对试验过程进行控制，通常称为力控、位控或参控试验。上述工作过程如图 3－17 所示，工作时试验人员通过计算机编制试验程序或直接发出动作指令，指令信号传输给模拟控制器。模拟控制器经过信号转换等一系列过程后向电液伺服阀发出相应的模拟电信号，电液伺服阀则根据模拟电信号指挥作动器按试验设计的动作运动，如向试件施加需要的力、位移或应变等。至此，与普通液压系统加载过程相似，由于作动器所施加的力或位移等没有被测量反馈回控制器，所以称为开环控制过程。电液伺服系统还将通过安装在作动器或试件上的力、位移或应变等传感器将作动器实际工作信号反馈给测量反馈调节器，并在运算器内与指令信号对比运算后产生调差信号，再向电液伺服阀发出调差命令，伺服阀根据调差命令继续操作作动器，该过程循环进行。整个操作过程包括命令信号产生、加载信号执行以及误差信号反馈等步骤，形成了一个闭合回路，因而称为闭环控制过程。模拟控制器含有微处理器，具有记忆、运算能力，每一闭环控制过程都由模拟控制器在瞬间自动执行，整个试验过程中不需人为干预，试验人员只需通过计算机向模拟控制器发出试验加载指令并观测试验反馈值，也可预先编制好试验程序，而整个试验过程完全由计算机和试验系统自动完成。

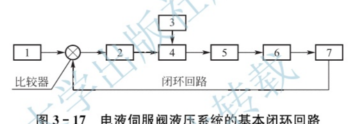


图 3－17　电液伺服阀液压系统的基本闭环回路

1—指令信号；2—调整放大系统；3—油泵；4—伺服阀；
5—加载器；6—传感器；7—反馈系统

电液伺服阀是极其精密的元件，价格昂贵。它对液压油的型号和清洁度要求很高，不可随便乱用，对环境温度也有所限制，对系统的操作和维护要求有较高的技术。

3.5.5　地震模拟振动台

地震模拟振动台能很好地模拟地震过程或进行人工地震波的试验，是实验室内研究结构地震反应和破坏机理的最直接的方法。这种设备可用于研究工业与民用建筑、桥梁、水工结构、海洋结构、原子能反应堆等结构的抗震性能及动力特性等，是目前结构抗震研究中的重要试验手段之一。

地震模拟振动台是一种跨学科的复杂高科技产品，其设计和建造涉及土建、机械、液压、电子技术、自动控制和计算机技术等多个学科，主要由台面和基础、高压油源、管路系统、电液伺服作动器、模拟控制系统、计算机控制系统和数据采集处理系统七大部分组成，如图 3－18 所示。

1. 振动台的基本性能指标

振动台的主要技术参数有承载能力、台面尺寸、激振力和使用频率范围等。承载能力

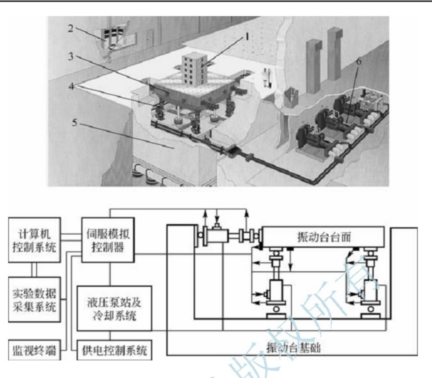


图 3-18　地震模拟振动台系统

1—试验结构模型；2—控制室；3—振动台台面；4—电液伺服助动器；5—振动台基础；6—液压动力系统

和台面尺寸是决定振动台规模的主要技术指标，决定了振动台所能承担的试验规模，常分为三种规模：承载能力 100kN，台面尺寸 2m×2m 以内的为小型；承载力在 200kN 左右，台面尺寸在 6m×6m 以内的为中型；大型振动台的承载能力可达数百吨以上。目前世界上最大的振动台台面尺寸达 15m×25m。大部分振动台都采用电液伺服方式驱动。振动台的位移幅值在±100mm 以内，最大速度为 80cm/s，最大加速度 2g(1.2g 即可满足要求)，振动台的最大激振力可根据最大荷载作用下应产生的最大加速度确定，即加速度与运动质量之积。振动台的使用频率为 0～50Hz，特殊情况可达 100Hz 以上，振动台频率的上限受电液伺服阀特性和油源系统流量限制。一般情况下，当试验模型的频率相似常数 $S_w=1/\sqrt{S_e}$，几何相似常数为 1/10 时，振动台满载时的最大频率不应低于 33Hz。

2. 台面与基础

振动台的台面要有足够的刚度和承载能力，自振频率应远离振动台的使用频率，以免产生共振，一般其一阶弯曲频率应高于$\sqrt{2}$倍的最大使用频率。台面重量应尽量轻，以获得更大的激振加速度，目前大多数振动台台面是由钢板焊接而成的格栅结构。

振动台基础的设计与处理十分重要，如果设计不当会对人身和建筑物产生严重的影响。基础的最大加速度应小于 0.005g，基础最小重量应大于最大激振力的 20 倍，通常基础重量约为最大台面重量(包括构件)的 20～50 倍，这样可以改善系统的高频特性，并可以减小对周围建筑和其他设备的影响。

3. 液压驱动和动力系统

油源与管路系统是驱动振动台的液压动力源，其压力及流量均应满足振动台最大激振力和最大工作速度的要求。地震过程是一个脉冲过程，需要液压泵站的瞬间流量很大，为

减小系统流量，常在管路系统中设置大型蓄能器提供瞬时所需驱动力。在容许的系统压力下降范围内，蓄能器能瞬时提供很大的流量，试验时可选用较小工作流量的液压泵站，这是地震模拟试验台比较经济的组成方式。

液压驱动系统给振动台以巨大的推力，按照振动台是单向(水平或垂直)、双向(水平-水平或水平-垂直)或三向(二向水平-垂直)运动，并在满足产生运动各项参数的要求下，各向加载器的推力取决于可动质量的大小和最大加速度的要求。目前世界上已经建成的大中型的地震模拟振动台，大都采用电液伺服系统来驱动。它在低频时能产生大推力，故被广泛应用。

4. 控制系统

为了真实再现地震波的作用，地震模拟振动台需要一个精密的控制系统。目前运行的振动台有两种控制方式，一种是纯模拟量控制；另一种是模拟＋数字控制。模拟控制方法有两种：一种是采用位移反馈控制的 PID 控制方法，并采用压差反馈作为提高系统稳定的补偿，德国的 SCHENCK 公司采用的就是这种控制方法；另一种方法是将位移、速度和加速度共同进行反馈的三参量反馈控制方法，美国 MTS 公司采用的就是这种控制方法。在单纯的位移反馈控制中，由于系统的阻尼小，很容易产生不稳定现象，为此在系统中加入加速度反馈，增大系统阻尼从而保证系统稳定。与此同时，还可以加入速度反馈，以提高系统的反应性能，由此可以减小加速度波形的畸变。为了能使直接得到的强地震加速度记录推动振动台，在输入端可以通过二次积分，同时输入位移、速度和加速度三种信号进行控制。

为了提高振动台控制精度，很多振动台利用计算机进行数字迭代补偿地震再现时的失真。试验时，振动台台面的地震波是期望再现的地震波信号，但振动台是一个非常复杂的控制对象，其振动效果不仅与模拟控制系统、作动器、台面等部分的工作特性有关，而且与试件的特性也有关系，尤其当结构模型在试验过程中不断出现非线性变化直到破坏时，使振动台在试验过程中的工况变化很大，而导致计算机给台面输入激励信号所产生的反应与输出的期望之间存在误差。为了减小这种误差，利用计算机采用数字迭代控制方法，即在每次驱动振动台后，将台面再现的结果与期望信号进行比较，根据两者的差异对驱动信号进行修正后再次驱动振动台，并再一次比较台面再现结果与期望信号，直到台面再现的结果满足要求为止，这样可以在台面得到较满意的地震效果。

5. 测度分析系统

测试系统除了对台身运动进行控制而测量其位移、加速度等外，还可对被测试模型进行多点测量，一般是测量位移、加速度和应变等，根据需要来了解整个模型的反应。位移测量多数采用差动变压器式和电位计式的位移计，可测量模型相对于台面的位移或相对于基础的位移；加速度测量多采用应变式加速度计、压电式加速度计，近年来也有采用差容式或伺服式加速度计的。

电液式激振器的优点是重量轻、体积小，但却能产生很大的激振力，这种电液式激振器又称为动力千斤顶、电液伺服千斤顶、加振器、作动器等。电液式振动台推力可达几十千牛顿，甚至可达几百千牛顿，主要用于大型结构物的振动试验，如汽车的行驶模拟试验、工程结构的抗震试验、飞行器的动力试验以及电工、电子产品的整机环境试验、筛选试验等。

3.6　惯性力加载法

在结构动力试验中，利用物体质量在运动时产生的惯性力对结构施加动荷载。按产生惯性力的方法通常分为冲击力、离心力和直线位移惯性力三类。

3.6.1　冲击力加载

冲击力加载的特点是荷载作用时间极为短促，在它的作用下使被加载结构产生自由振动，适用于进行结构动力特性的试验。冲击力加载方法有初位移法和初速度法两种。

1. *初位移加载法*

初位移加载法也称为张拉突卸法，如图 3－19(a)所示。在结构上拉一钢丝缆绳，使结构变形而产生一个人为的初始强迫位移，然后突然释放，使结构在静力平衡位置附近做自由振动。在加载过程中当拉力达到足够大时，事先连接在钢丝绳上的钢拉杆被拉断而形成突然卸载，通过调整拉杆的截面即可由不同的拉力而获得不同的初位移。

对于小模型则可采用如图 3－19(b)所示的方法，使悬挂的重物通过钢丝对模型施加水平拉力，剪断钢丝造成突然卸载。这种方法的优点是结构自振时荷载已不存在于结构，没有附加质量的影响，但仅适用于刚度不大的结构。为防止结构产生过大的变形，加载的数量必须正确控制，经常是按所需的最大振幅计算求得。这种加载方式存在一个值得注意的问题是使用怎样的牵拉和释放方法才能使结构仅在一个平面内产生振动，而不会由于加载作用点的偏差而使结构在另一个平面内同时振动产生干扰；另一个问题是如何准确控制试件的初始位移。

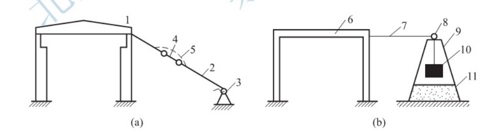


图 3－19　用张拉突卸法对结构施加冲击力荷载

1—结构物；2—钢丝绳；3—铰车；4—钢拉杆；5—保护索；6—模型；
7—钢丝；8—滑轮；9—支架；10—重物；11—减振垫层

2. *初速度加载法*

初速度加载法也称突加荷载法。如图 3－20 所示，利用摆锤或落重的方法使结构在瞬时内受到水平或垂直的冲击，产生一个初速度，同时使结构获得所需的冲击荷载。这时作用力的总持续时间应该比结构的有效振型的自振周期短很多，所以引起的振动是初速度的函数，而不是力大小的函数。

当采用如图 3－20(a)的摆锤进行激振时，如果摆和建筑物有相同的自振周期，摆锤的

运动就会使建筑物引起共振，产生自由振动。采用图 3-20(b)的方法时，荷载将附着于结构一起振动，并且落重的跳动又会影响结构自由振动，同时有可能使结构受到局部损伤。这时冲击力的大小要按结构强度计算，不致使结构产生过度的应力和变形。

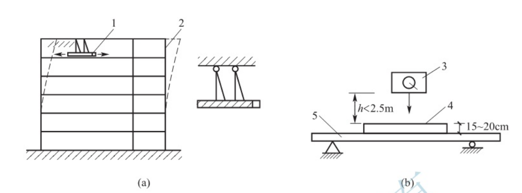


图 3-20　用摆锤或落重法施加冲击力荷载

1—摆锤；2—结构；3—落重；4—砂垫层；5—试件

用垂直落重冲击时，落重取结构自重的 0.1%(指试验对象跨间)，落重高度 $h \leqslant 2.5m$，为防止重物回弹再次撞击和局部受损，拟在落点处铺设 15～20cm 的砂垫层。

3. 反冲激振法

近年来在结构动力试验中研制成功了一种反冲激振器，也称火箭激振。它适用于现场对结构实物进行试验，小冲量反冲激振器也可用于室内试验。

图 3-21 为反冲激振器的结构示意图。激振器的壳体用合金钢制成，它主要由燃烧室壳体、底座、喷管、火药、点火装置五部分组成。

反冲激振器的基本工作原理是点火装置使火药燃烧，火药产生的高温高压气体便从喷管口以极高的速度喷出。如果气流每秒喷出的质量为 W，则按动量守恒定律可得到反冲力 P 为

$$P = W \cdot v/g \tag{3-2}$$

式中　v——气流从喷口喷出的速度；

　　g——重力加速度。

反冲激振器的输出特性曲线如图 3-22 所示，主要分为升压段、平衡压力工作段及火药燃尽后燃气继续外泄阶段。根据火药的性能、质量及激振器的结构，可设计出不同的特性曲线。

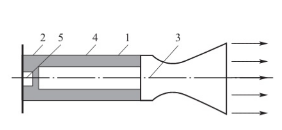


图 3-21　反冲激振器结构示意

1—燃烧室壳体；2—底座；3—喷管；4—燃烧室壳体；5—点火装置

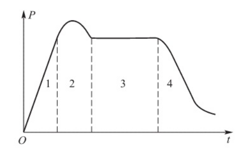


图 3-22　反冲激振器输出特性曲线

1—上升段；2—高峰段；3—平衡压力工作段；4—后效段

目前设计与使用的反冲激振器的性能如下：①反冲力为 0.1～0.8kN，1～8kN 共八种；②反冲输出近似于矩形脉冲；③上升时间为 2ms；④持续时间为 50ms；⑤下降时间为 3ms；⑥点火延时时间为 25ms±5ms。

当采用单个反冲激振器激发时，一般是将激振器布置在建筑物顶部，并尽量置于建筑物质心的轴线上，这样效果较好。如果将单个激振器布置在离质心位置较远的地方或在结构平面的对角线上以相反方向布置两台相同反冲力的激振器，可以进行建筑物的扭振试验。若将多个反冲激振器沿高耸结构不同高度布置，还可以进行高阶振型的测定。

3.6.2 离心力加载

离心力加载是根据旋转质量产生的离心力对结构施加简谐振动荷载。其特点是运动具有周期性，作用力的大小和频率按一定规律变化，使结构产生强迫振动。

利用离心加载的机械式激振器的原理如图 3－23 所示，使一对偏心块按相反方向运转，通过离心力产生一定方向的激振力。

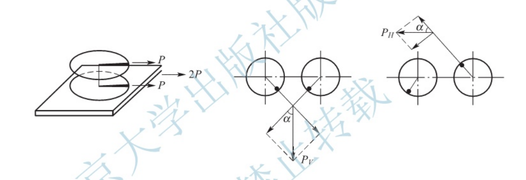


图 3－23 机械式激振器的原理

由离心块产生的离心力为

$$P = m\omega^2 r \tag{3-3}$$

式中 m——偏心块质量；

ω——偏心块旋转角速度；

r——偏心块旋转半径。

在任何瞬时产生的离心力均可分解成垂直与水平两个分力：

$$\left.\begin{aligned} P_V &= P\sin\alpha = m\omega^2 r\sin\alpha \\ P_H &= P\cos\alpha = m\omega^2 r\cos\alpha \end{aligned}\right\} \tag{3-4}$$

这里 P_V、P_H 是按简谐规律变化的。

试验时将激振器底座固定在被测结构物上，由底座把激振力传递给结构，致使结构受到简谐变化激振力的作用。一般要求底座有足够的刚度，以保证激振力的传递效率。

激振器产生的激振力等于各旋转质量离心力的合力。改变质量或调整带动偏心质量运转电机的转速，即改变角速度 ω，可调整激振力的大小。通过改变偏心块旋转半径 r 也可

以改变离心力大小。

激振器由机械和电控两部分组成。机械部分主要是由两个或多个偏心质量组成，对于小型的激振器，其偏心块安装在圆形旋转轮上，调整偏心轮的位置，可形成垂直或水平的振动。近年来研制成功的大型同步激振器在机械构造上采用双偏心水平旋转式方案，偏心块安装于扁平的扇形筐内，这样可使旋转时质量更为集中，提高激振力，降低动力功率。

一般的机械式激振器工作频率范围较窄，大致在 50～60Hz 以下。由于激振力与转速的平方成正比，所以当工作频率很低时，激振力就较小。

为了改进一般激振器的稳定性和测速精度，并提高激振力，在电气控制部分采用单相可控硅速度、电流双闭环反馈电路系统，对直流电机实行无级调速控制。利用测速发电机做速度反馈，通过调整角机产生角差信号，并将信号送往速度调节器与给定信号综合，以保证两台或多台激振器不但速度相同且角度也按一定关系运行。

多台同步激振器同时使用时，不仅可以提高激振力，而且可以扩大试验内容，如根据需要将激振器分别装置于结构物的特定位置上，可以激起结构物的某些高阶振型，给研究结构高频特性带来便利。例如，两台激振器反向同步激振，就可进行扭振试验。

当将激振器水平激振要求与刚性平台连接，就构成了早期的机械式水平振动台。

3.6.3　直线位移惯性力加载

直线位移惯性力加载系统，它的主要动力部分就是电液伺服加载系统，通过电液伺服阀控制固定在结构上的双作用液压加载器，带动质量块做水平直线往复运动，如图 3-24 所示。运动着的质量块产生的惯性力激起结构振动，通过改变指令信号的频率，即可调整平台频率，改变负荷重块的质量，即可改变激振力的大小。

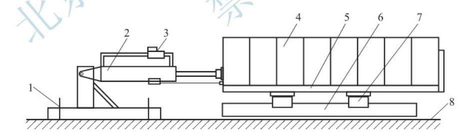


图 3-24　直线位移惯性力加载系统

1—固定螺栓；2—双作用液压加载器；3—电液伺服阀；4—荷重；
5—平台；6—钢轨；7—低摩擦直线滚轮；8—结构楼板

这种加载方法的特点适用于现场结构动力加载，在低频条件下其各项性能指标较好，可产生较大的激振力，但频率较低，只适用于 1Hz 以下的激振。

3.7　电磁加载法

在磁场中通电的导体要受到与磁场方向相垂直的作用力，电磁加载就是根据这个

原理，在强磁场(永久磁铁或直流励磁线圈)中放入动圈，通入交变电流，使固定于动圈上的顶杆等部件做往复运动，从而对试验对象施加荷载。若在动圈上通以一定方向的直流电，则可产生静荷载。目前常见的电磁加载设备有电磁式激振器和电磁振动台。

3.7.1　电磁式激振器

电磁激振器是由磁系统(包括励磁线圈、铁心、磁极板)、动圈(工作线圈)、弹簧、顶杆等部件组成。图 3-25(a)所示为电磁式激振器的构造图，动圈固定在顶杆上，置于铁心与磁极板的空隙中，顶杆由弹簧支承并与壳体相连。弹簧除支承顶杆外，工作时还使顶杆产生一个稍大于电动力的预压力，使激振时不致产生顶杆撞击试件的现象。

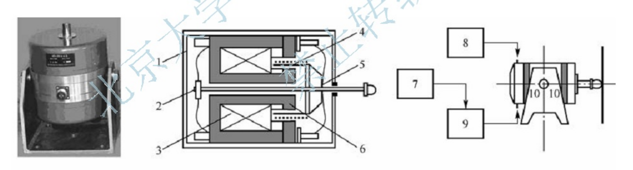
当激振器工作时，在励磁线圈中通入稳定的直流电，使在铁心与磁极板的空隙中形成一个强大的磁场。与此同时，由低频信号发生器输出一交变电流，并经功率放大器放大后输入工作线圈。这时工作线圈即按交变电流谐振规律在磁场中运动并产生一电磁感应力 F，使顶杆推动试件振动，如图 3-25 所示。根据电磁感应原理：

$$F=0.102BLI\times10^{-4} \qquad (3-5)$$

式中　B——磁场强度；

L——工作线圈导线的有效长度；

I——通过工作线圈的交变电流。



(a) 电磁式激振器的构造　　(b) 电磁式激振器的工作原理

图 3-25　电磁式激振器

1—外壳；2—支承弹簧；3—动圈；4—铁心；5—励磁线圈；6—顶杆；
7—信号发生器；8—功率放大器；9—励磁电源；10—电磁式激振器

当通过工作线圈的交变电流以简谐规律变化时，则通过顶杆作用于结构的激振力也按同样的规律变化。在 B、L 不变的情况下，激振力 F 与电流 I 成正比。

电磁激振器的支承弹簧有各种形式，如板梁弹簧、花板弹簧、产生剪切变形的橡皮和空气弹簧等。一般希望弹簧具有较大的线性范围、非振动方向的刚度大、重量轻、有一定的阻尼等特点。

电磁激振器使用时装于支座上，可以做垂直激振，也可做水平激振。

电磁激振器的频率范围较宽，一般在 0～200Hz，国内个别产品可达 1000Hz，推力可

达几千牛顿，重量轻，控制方便，按给定信号可产生各种波形的激振力。缺点是激振力不大，一般仅适于小型结构及模型试验。

3.7.2　电磁式振动台

电磁式振动台工作原理基本上与电磁激振器一样，其实际上是利用电磁激振器推动一个活动的台面而构成。

电磁式振动台由信号发生器、自动控制仪、功率放大器、电磁激振器和台面组成，如图 3－26 所示。

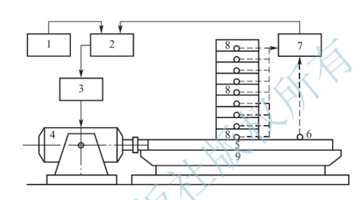


图 3－26　电磁式振动台组成系统

1—信号发生器；2—自动控制仪；3—功率放大器；4—电磁激振器；
5—振动台台面；6—测振传感器；7—记录系统；8—试件；9—台座

当励磁线圈中通入直流电流时，即产生强大的电磁场。因驱动线圈位于有强磁场的环形空气隙内，当驱动线圈中输入交变电流时，由于磁场的相互作用，即产生电磁感应力来推动可动部分运动。改变驱动线圈中电流的强度及频率，即可改变振动台的振动幅值及频率，台面的振动量可由安置在台面上的传感器来进行监视。

驱动线圈和励磁线圈工作时温度都会升高，为此振动台还应设有相应的冷却装置。

自动控制仪由自动扫频装置、振动测量及定振装置等部分组成。它是按闭环振动试验的要求设计的。①信号发生器可提供功率放大器所需要的各种激励信号，可以是正弦波、三角波、方波或随机波等信号，这样振动台台面就会按提供的信号进行振动；②振动测量通过加速度传感器将近台面振动的加速度转换成电信号加以放大与积分，从而测出振动台台面的加速度、速度和位移值，有时也可用速度或位移传感器直接测得；③测得的振动信号，通过定振装置反馈给信号发生器，即可对振动台进行自动控制。

一般来说，带有振动自动控制仪的振动台，能按照人们预定的振动值进行试验，使用较为方便。振动台台面的支承形式随台面尺寸大小而不同：在小型电磁式振动台上用悬吊簧片支承台面；对于激振力和台面尺寸较大的振动台，台面可用液压导轨油膜支承，台面能在油膜上浮起，支承面上摩擦力很小，保证台面运行稳定，反应灵敏。

电磁式振动台使用频率范围较宽，台面振动波形较好，一般失真度在 5％以下，操作使用方便，容易实现自动控制。但用电磁振动推动水平台在进行结构模型试验时，由于激振力不够大，台面尺寸和模型质量均会受到限制。

3.8　现场激振方法

在结构动力试验的加载方法中，一般都需要比较复杂的设备，这些在实验室内尚可满足，而在野外现场试验时，往往受到各方面条件的限制难以实现。因此人们设法寻求更简单的试验方法，既可获得有关结构动力特性的资料和数据，又无需复杂的设备。

3.8.1　人体激振

在试验中发现，人们可以利用自身在结构物上的有规律的活动，即使人的身体做与结构自振周期相近的往复运动，产生足够大的惯性力，就有可能形成适合做共振试验的振幅。这对于自振频率比较低的大型结构来说，完全有可能被激振到足可进行量测的程度。

国外有人试验过，一个体重约70kg的人，使其质心做频率为1Hz、双振幅为15cm的前后运动时，将产生大约0.2kN的惯性力。由于在1%临界阻尼的情况下共振时的动力放大系数为50，这意味着作用于建筑物上的有效作用大约为10kN。

利用这种方法曾在一座15层钢筋混凝土建筑上取得了振动记录。开始几周运动就达到最大值，这时操作人员停止运动，使结构做有阻尼自由振动，从而获得了结构的自振周期和阻尼系数。

3.8.2　人工爆炸激振

人工爆炸激振是指在试验结构附近场地采用炸药进行人工爆炸，利用爆炸产生的冲击波对结构进行瞬时激振，使结构产生强迫振动。可按经验公式估算人工爆炸产生场地地震的加速度 a 和速度 v：

$$a = 21.9\left(\frac{Q^m}{R}\right)^n \tag{3-6a}$$

$$v = 118.6\left(\frac{Q^m}{R}\right)^q \tag{3-6b}$$

式中　Q——炸药量(t)；

R——试验结构距离爆炸源的距离(m)；

m、n、q——与试验场地土质有关的参数。

3.8.3　环境随机振动激振

在结构动力试验中，除了利用以上各种设备和方法进行激振加载以外，环境随机振动激振法近年来发展很快，被人们广泛应用。

环境随机振动激振法也称脉动法。人们在许多试验观测中，发现土木工程结构由于受外界干扰而经常处于微小而不规则的振动之中，其振幅在10μm以下。这种微小而不规则

的振动来源于微小的地震活动、风或气压的变化、机器运作、车辆行驶等人为扰动和附近地壳内部小的裂缝，使地面存在着连续不断的运动，其运动的幅值极为微小，而它所包含的频谱是相当丰富的，故称为地面脉动。地面脉动使建筑物经常处于微小而不规则的脉动中，通常称为建筑物脉动。可以利用这种脉动现象来分析测定结构的动力特性，它不需要任何激振设备，又不受结构形式和大小的限制。

20 世纪 50 年代开始，我国就应用这一方法测定结构的动态参数，但数据分析方法一直采取从结构脉动反应的时程曲线记录图上按照“拍”的特征直接读取频率数值的主谐量法，所以一般只能获得第一振型频率这个单一参数。20 世纪 70 年代随着计算机技术的发展、结构动态分析仪的诞生和应用，使这一方法得到了迅速发展。利用脉动，采用高灵敏度的传感器、放大记录设备，量测结构的反应，借助于随机信号数据处理的技术，分析确定结构的动力特性，从记录到的结构脉动信号中识别出全部模态参数，这使环境随机激振法有了开创性的进展。

3.9　荷载支承装置和试验台座

3.9.1　支座与支墩

结构试验中的支座与支墩是试验装置中模拟结构受力和边界条件的重要组成部分，是支承结构、正确传递作用力和模拟实际荷载图式的设备。对于不同的结构形式、不同的试验要求，就要有不同的支座与之相适应，这是试验装置设计中应考虑的重要问题。

1. 支座

按作用方式不同，支座有活动铰支座、固定铰支座、球铰支座和刀口支座(固定铰支座的一种特定形式)。铰支座一般都用钢材制作，常见的构造形式如图 3－27 所示。对铰支座的基本要求如下。

(1) 保证试件在支座处能自由转动。

(2) 保证试件在支座处力的传递。

如果试件在支承处没有预埋支承钢垫板，试验时必须另加垫板。其宽度一般不得小于试验支承处的宽度，支承垫板的长度 $2l$ 可按式(3－7)计算：

$$2l \geqslant \frac{R}{bf_c} \tag{3-7}$$

式中　R——支座反力(N)；

b——试件支座宽度(mm)；

f_c——试件材料的抗压强度设计值(MPa)；

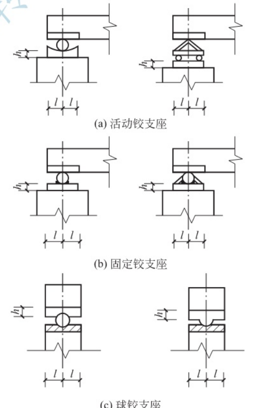


图 3－27　常见铰支座的形式

l——滚轴中心至垫板边缘的距离(mm)。

(3) 构件支座处铰的上下垫板要有一定刚度，其厚度为

$$h=\sqrt{\frac{2f_c l^2}{f_y}} \tag{3-8}$$

式中 f_y——垫板钢材的强度设计值(MPa)。

(4) 滚轴的长度，一般取试件支承处截面宽度 b。

(5) 滚轴的直径，可参照表 3-1 选用，并按式(3-9)进行强度验算：

$$\sigma=0.418\sqrt{\frac{RE}{rb}} \tag{3-9}$$

式中 E——滚轴材料的弹性模量(MPa)；

r——滚轴半径(mm)。

表 3-1 滚轴直径的选用

滚轴受力/(kN/mm)	<2	2~4	4~6
滚轴直径/mm	50~60	60~80	80~100

对于不同的结构形式，要求有不同的支座形式，具体如下。

1) 简支梁和连续梁支座

这类试件通常一端为固定铰支座，其他为滚动支座。安装时各支座轴线应彼此平行并垂直于试件的纵轴线。各支座间的距离取试件的计算跨度。

当需要模拟梁的嵌固端支座时，在实验室内可利用试验台座用拉杆锚固，如图 3-28 所示，只要保证支座与拉杆间的嵌固长度，即可满足试验要求。

2) 四角支承板和四边支承板的支座

在配置四角支承板支座时应安放一个固定滚珠；对于四边支承板，滚珠间距不宜过大，宜取板在支承处厚度的 3~5 倍。此外，对于四边简支板的支座应注意四个角部的处理。当四边支板无边梁时，加载后四角会翘起。因此，角部应安置能承受拉力的支座。板、壳支座的布置方式如图 3-29 所示。

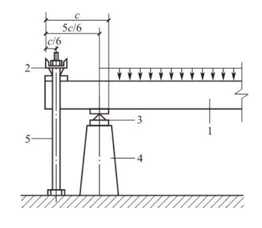


图 3-28 嵌固端支座构造

1—试件；2—上支座刀口；3—下支座刀口；4—支墩；5—拉杆

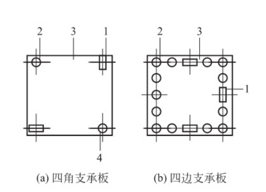


图 3-29 板壳结构的支座布置方式

1—滚轴；2—钢球；3—试件；4—固定球铰

3）受扭试件两端的支座

对于梁式受扭构件试验，为保证试件在受扭平面内自由转动，支座形式如图 3－30 所示。试件两端架设在两个能自由转动的支座上，支座转动中心应与试件中心相重合。两支座的转动平面应相互平行，并与试件的扭曲轴相垂直。

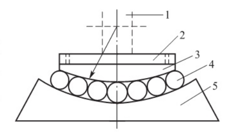


图 3－30　受扭试验转动支座构造

1—受扭试件；2—垫板；3—转动支座盖板；4—滚轴；5—转动支座

4）受压试件两端的支座

在进行柱与压杆试验时，试件应分别设置球形支座或双层正交刀口支座，如图 3－27、图 3－31 和图 3－32 所示。球铰中心与加载点重合，双层刀口的支点应落在加载点上。

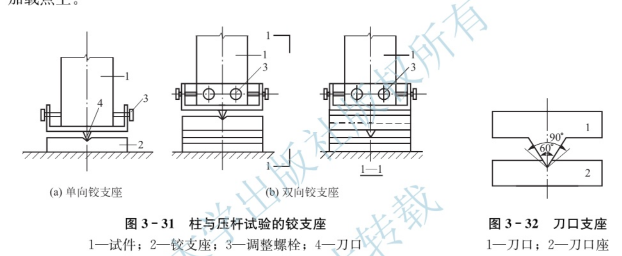


图 3－31　柱与压杆试验的铰支座

1—试件；2—铰支座；3—调整螺栓；4—刀口

图 3－32　刀口支座

1—刀口；2—刀口座

目前试验柱的对中方法有两种，即几何对中法和物理对中法。从理论上讲，物理对中法比较好，但实际上不可能做到整个试验过程中永远处于物理对中状态。因此，较实用的办法是控制截面(一般等截面柱为柱高度的中点)的形心线作为对中线，或计算出试验时的偏心距，按偏心线对中。

进行柱或压杆偏心受压试验时，对于刀口支座，可以用调节螺栓调整刀口与试件几何中线的距离，以满足不同偏心距的要求。

在试验机中做短柱抗压承载力试验时，由于短柱破坏时不发生纵向挠曲，短柱两端面不发生相对转动。因此，当试验机上下压板之一已有球铰时，短柱两端可不另加设刀口。这样处理是合理的，与混凝土棱柱强度试验方法相一致。

2. 支墩

支墩本身的强度必须进行验算，保证试验时不致发生过度变形。支墩在现场多用砖块临时砌成，支墩上部应有足够大的平整支承面，最好在顶部铺钢板，支承面积要按地耐力复核。在实验室内一般用钢或混凝土制成的专用支墩。

为了使用灵敏度高的位移量测仪表量测试验结构的挠度，提高试验精度，要求支墩和地基有足够的刚度与强度，在试验荷载下的总压缩变形不宜超过试验构件挠度的 1/10。

当试验需要使用两个以上的支墩时，如连续梁、四角支承板和四边支承板等，为了防止支墩不均匀沉降及避免试验结构产生附加应力而破坏，要求各支墩应具有相同的

刚度。

单向简支试件的两个支墩的高差应符合结构构件的设计要求，偏差不宜大于试件跨度的 1/50。因为过大的高差会在结构中产生附加应力，改变结构的工作机制。

双向板支墩在两个跨度方向的高差和偏差也应满足上述要求。

连续梁各中间支墩应采用可调式支墩，必要时还应安装测力计，按支座反力的大小调节支墩高度，因为支墩的高度对连续梁的内力有很大影响。

3.9.2　反力架

在进行结构试验加载时，液压加载器(即千斤顶)的活塞只有在其行程受到约束时才会对试件产生推力。利用杠杆加载时，也必须要有一个支承点承受支点的上拔力。故进行试验加载时除了前述各种加载设备外，还必须要有一套加荷架，才能满足试验的加载要求。

加荷架(又称反力架)是整个加载系统的荷载机构。加荷架的形式较多，按反力作用的方向分有竖向反力装置和水平反力装置；按是否移动分有固定式反力架和移动式反力架。

1. 竖向反力装置

竖向反力装置主要由荷载架、千斤顶连接杆件组成。

在实验室内荷载架一般由横梁、立柱组成的反力架和试验台座等组成，也可利用适宜于试验中小型构件的抗弯大梁或空间桁架式台座。在现场试验时则通过反力架用平衡重块、锚固桩头或专门为试验浇筑的钢筋混凝土地梁平衡试件的荷载。

荷载架主要由立柱和横梁组成。它可以用型钢制成，特点是制作简单，取材方便，可按钢结构的柱与横梁设计，横梁与柱的连接采用精制螺栓或圆销。对荷载架的承载力、刚度要求较高，能满足大型结构试验的要求。荷载架的高度和承载力可按试验需要设计，可成为实验室内固定的大型试验台座上的竖向加载架，如图 3 - 33 所示。



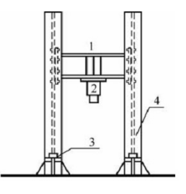


图 3 - 33　竖向加荷架

1—横梁；2—千斤顶；3—地脚螺栓；4—立柱

2. 水平反力装置

水平反力装置主要由反力墙(或反力架)及千斤顶水平连接件等组成。反力墙一般为固定式，而反力架则有固定式和移动式两种。

对于固定式反力墙，国内外大多采用混凝土结构(混凝土或预应力混凝土)，并且和试验台座刚性连接以减少自身的变形。在混凝土反力墙上，按一定距离设有孔洞，以便用螺栓锚住加载器的底板。反力墙与千斤顶的连接方式大致分为三种，即纵向滑轨式锚栓连接、螺孔式锚栓连接和横向滑轨式锚栓连接。利用反力墙组成的水平反复加载试验装置如图 3－34 所示。



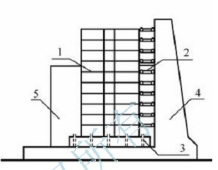


图 3－34　反力墙

1—试件；2—伺服千斤顶；3—地脚螺栓；4—主反力墙；5—副反力墙

移动式反力架一般采用钢结构，通过螺栓与试验台座的槽轨锚固。利用反力架和千斤顶滚轴装置组成的水平反复加载试验装置，如图 3－35 所示。这种反力架加载方便，使用灵活，可做成单片式或多片式，均为板梁式构件，可重复使用也可分别采用。移动式反力架可以满足双向施加水平力的要求，但其反力支架承载力较小。

3. 特殊反力装置

对于某些构件或结构试验，还常用一些专门的支承机构，如对隧道模型、箱形结构或桁架节点的试验采用加载框等，如图 3－36 所示。



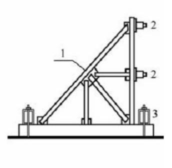


图 3－35　水平反力架

1—三角架；2—千斤顶；3—地脚螺栓

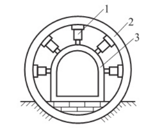


图 3－36　隧道模型加载框支承装置

1—加载器；2—加载框；3—试件

3.9.3　结构试验台座

在实验室内，结构试验台座是永久性的固定设备，用以平衡施加在试验结构物上的

荷载产生的反力。试验台座的台面一般与实验室地坪标高一致，这样可以充分利用实验室的地坪面积，使室内水平运输搬运物件比较方便，但易干扰试验活动；也可以高出地平面，使之成为独立体系，这样试验区划分比较明确，不受周边活动及水平交通运输的影响。

试验台的长度和宽度为十几米到几十米，台座的承载能力一般在 200～1000kN/m^2，台座的刚度极大，受力后变形极小，能允许在台面上同时进行多个结构试验，不需考虑相互的影响。

试验台座除具有平衡加载时产生的反力外，也能用以固定横向支架，保证构件的侧向稳定。还可以通过水平反力支架对试件施加水平荷载。由于试验台座自身刚度很大，所以能消除试件试验时支座沉降变形的影响。

设计台座时，其纵向和横向均应按各种试验组合可能产生的最不利受力情况进行验算与配筋，以保证具有足够好的强度和整体刚度。用于动力试验的台座还应有足够好的质量和耐疲劳强度，防止引起共振和疲劳破坏，尤其应注意局部预埋件和焊缝的疲劳破坏。如果实验室内同时有静力和动力台座，则静力试验台座与动力试验台座应分离设置，避免动力试验对静力试验的干扰。

按结构的不同，目前国内外常见的试验台座可分为槽式试验台座、地脚螺栓式试验台座、箱式试验台座、抗侧力试验台座等。

1. 槽式试验台座

这是目前国内用得较多的一种比较典型的静力试验台座，其构造特点是沿台座纵向全长布置若干条槽轨，这些槽轨是用型钢制成的纵向框架式结构，埋置在台座的混凝土内，如图 3－37 所示。槽轨的作用在于锚固加载支架，用以平衡结构物上的荷载所产生的反力。如果加荷架立柱用圆钢制成，可直接用两个螺母固定于槽内；如加荷架立柱由型钢制成，则在其底部设计成类似钢结构柱脚的构造，用地脚螺栓固定在槽内。在试验加载时立柱受向上拉力，故要求槽轨的构造应该和台座的混凝土部分有很好的联系，不致变形或拔出。这种台座的特点是加载点位置可沿台座的纵向任意变动，不受限制，以适应试验结构不同加载位置的需要。

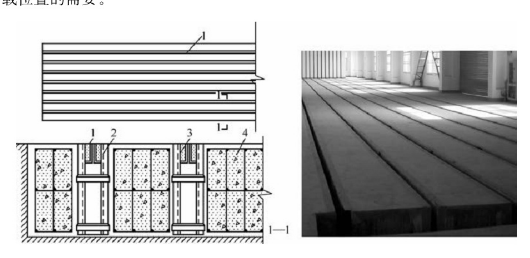


图 3－37　槽式试验台座横向剖面

1—槽轨；2—型钢骨架；3—高强度等级混凝土；4—混凝土

2. 地脚螺栓式试验台座

这种试验台的特点是在台面上每隔一定间距设置一个地脚螺栓，螺栓下端锚固在台座内，其顶端伸出于台座表面特制的圆形孔穴内(但略低于台座表面标高)，使用时通过用套筒螺母与加荷架的立柱连接，平时可用圆形盖板将孔穴盖住，保护螺栓端部及防止杂物落入孔穴。其缺点是螺栓受损后修理困难。另外，由于螺栓和孔穴位置已经固定，所以试件安装就位的位置受到限制，不像槽式台座那样可以移动，灵活方便。这类台座通常设计成预应力钢筋混凝土结构，造价低。

图 3－38 所示为地脚螺栓式试验台座的示意图。这类试验台座不仅用于静力试验，同时可以安装结构疲劳试验机进行结构构件的动力疲劳试验。

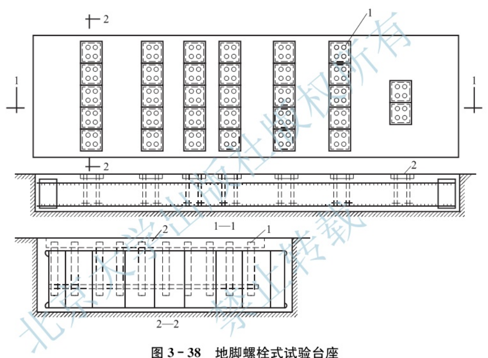


图 3－38　地脚螺栓式试验台座

1—地脚螺栓；2—台座地槽

3. 箱式试验台座

图 3－39 所示为箱式试验台座(孔式试验台座)示意图。这种试验台座的规模较大，由于台座本身构成箱形结构，所以比其他形式的台座具有更大的刚度。在箱形结构的顶板上，沿纵、横两个方向按一定间距留有竖向贯穿的孔洞，便于沿孔洞连线的任意位置固定试件，即先将槽轨固定在相邻的两孔洞之间，然后将立柱或拉杆按需要加载的位置固定在槽轨中。试验时也可将立柱或拉杆直接安装于孔内，故也称作孔式试验台座。试验时测量工作和试验加载工作可在台座上面进行，也可在箱形结构内部完成。由于台座结构下部构成实验室的地下室，也可供长期荷载试验或特殊试验使用。大型箱形试验台座可同时兼做实验室建筑的基础。

4. 槽锚式试验台座

这种台座兼有槽式及地锚式台座的特点，如图 3－40 所示。同时，由于抗震试验的需要，利用锚栓一方面可固定试件，另一方面可承受水平剪力。

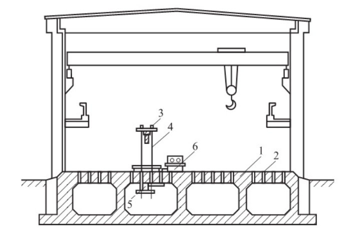


图 3-39　箱式试验台座剖面

1—箱形台座；2—顶板上的孔洞；3—试件；4—加荷架；5—液压加载器；6—液压操纵台

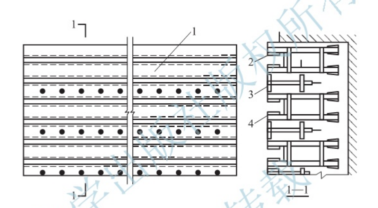


图 3-40　槽锚式试验台座

1—滑槽；2—高强度混凝土；3—槽钢；4—锚栓

5．抗弯大梁式台座

在预制构件厂和小型结构实验室中，当缺少大型试验台座时，也可以采用抗弯大梁式或空间桁架式台座，以满足中小型构件试验或混凝土制品检验的要求。抗弯大梁台座本身是一根刚度极大的钢梁或钢筋混凝土大梁，其构造如图 3-41 所示。当用液压加载器和分配梁加载时，产生的反作用力通过门型荷载架传至大梁，试验结构的支座反力也由台座大梁承受，使之保持平衡。抗弯大梁式台座由于受大梁本身抗弯强度与刚度的限制，一般只能试验跨度在 7m 以下、宽度在 1.2m 以下的板和梁。

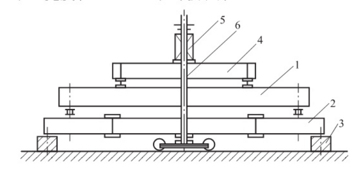


图 3-41　抗弯大梁式台座的荷载试验装置

1—试件；2—抗弯大梁；3—支墩；4—分配梁；5—液压加载器；6—荷载加荷架

6. 空间桁架式台座

这种台座是由型钢制成的专门试验架，一般用于进行中等跨度的桥架及屋面大梁的试验，如图 3－42 所示。它可施加为数不多的集中荷载，液压加载器的反作用力由空间桁架自身平衡。

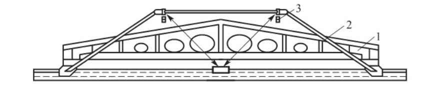


图 3－42　空间桁架式台座

1—试件(屋面大梁)；2—空间桁架式台座；3—液压加载器

7. 抗侧力试验台座

在结构试验研究中，除了需要对构件施加垂直荷载外，有时还需要施加水平方向的荷载。例如，在结构抗震试验研究时，需要进行结构抗震的静力和动力试验，为此，常利用电液伺服加载系统对结构或模型施加模拟地震作用的低周反复水平荷载，这就要求有水平反力设施平衡所施加的作用力。因此，常在台座的端部建有刚度极大的抗侧力结构，称为水平反力墙，用以承受和抵抗在结构试验中水平荷载所产生的反作用力。由于刚度要求较高，水平反力墙的结构一般建成钢筋混凝土或预应力钢筋混凝土的实体墙，有时为了增大结构刚度而采用箱形结构。在墙体的纵横方向按一定距离间隔布置锚孔，以便试验时在不同位置上固定水平加载的液压加载器。抗侧力墙体结构与水平台座连成整体，以提高墙体抵抗弯矩和底部剪力的能力，水平反力墙可以做成单向或双向 L 形两种，如图 3－43 所示。抗侧力装置也可采用钢制反力架，利用地脚螺栓将其与水平台座连接锚固。这种装置的特点是，反力钢架可随意拆卸，可根据需要移动位置或改变高度(将两个钢推力架竖向叠接)。缺点是用钢量较大，而且承载能力受到限制。此外，钢反力架与台座的连接锚固复杂，同时也无法在任意位置安装水平加载器。

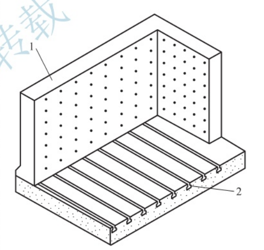


图 3－43　抗侧力试验台座

1—反力墙；2—槽式台座

本 章 小 结

本章系统地介绍了土木工程结构试验中的加载设备及相关试验装置，包括重力加载、机械力加载、气压加载、液压加载、惯性力加载、电磁加载、现场激振加载、荷载支承装置和试验台座等内容，并详细阐述了各种加载方法的作用方式、所需加载设备、基本原理和要求，重点介绍了液压加载法。这些方法是长期以来从结构试验的科研和生产实践中总

结出来的行之有效的方法，各有特点，有的较适于现场试验，如重力加载法、人工激振加载法、环境随机振动激振法等；有的技术先进、复杂，体现了现代建筑结构试验的发展水平，如电液伺服加载系统、地震模拟振动台等。同时，反力设备是结构试验中必不可少的部分。本章介绍了支座、反力架、试验台、水平反力墙及适用于现场试验的试验大梁等。结构试验中，采取合理的加载方法，设置可靠的支座和反力设施，是保证试验得以顺利进行乃至关系到试验成效的关键。

思　考　题

1. 重物加载方法的作用方式及其特点要求是什么？
2. 简述液压加载器的种类、加载的特点及适用范围。
3. 电液伺服加载系统的工作原理是什么？与普通液压加载系统有何区别？
4. 气压加载有哪两种？哪些结构适合采用气压加载？
5. 简述惯性力加载方法及其原理。
6. 什么是环境随机振动激振法？有何特点？
7. 现场动力试验的动力激振方法有哪几种？
8. 试验支座和支墩各有什么作用？对其有何要求？
9. 结构试验中反力设施有哪些？它们各自的作用是什么？

第4章　结构试验的量测技术

教学目标

掌握土木工程结构试验中应变、位移、荷载、裂缝、温度、测振等参数的测试方法。掌握各种传感器的工作原理、适用范围及其特点。了解数据采集系统的构成、分类及采集过程。

教学要求

知识要点	能力要求	相关知识
量测仪器的工作原理	(1) 了解量测仪器的分类及主要技术指标 (2) 了解量测仪表的选用原则及仪表的率定	测试系统
各类常用试验量测设备的使用方法	(1) 掌握电阻应变片的工作原理、使用方法，桥路的组成原理，熟练使用应变的其他量测方法与仪器 (2) 掌握位移计的工作原理和使用方法 (3) 掌握力传感器的工作原理和使用方法 (4) 掌握裂缝、温度量测仪器工作原理和使用方法 (5) 掌握测振传感器的工作原理和使用方法	机测法 电测法
数据采集系统	(1) 了解数据采集系统的组成和分类 (2) 了解数据采集的过程	传感器 数据采集仪



引言

结构的应力和变形性能是量测参数的重要组成部分。结构静态参数可分为局部纤维应变和整体变形两大类，结构动态参数主要是结构的动力特征和结构振动随时间变化的动态反应。由于静态和动态参数的特征不同，采用的量测仪表和量测方法也有所区别。量测仪器从最简单的逐个读数、手工记录数据的仪表，到计算机快速、连续、自动采集数据并进行处理的复杂系统，种类繁多，原理各异。本章系统地阐述了应变、位移、力值、裂缝、振动等参数的量测原理与方法，并对测量仪器、数据采集与记录系统进行了简要介绍。

4.1　量测技术概述

结构试验的量测技术是指通过一定的测量仪器或手段，直接或间接地取得结构性能变

化的定量数据。量测技术一般包括量测方法、量测仪器、量测误差分析三部分，各个不同专业领域都有与自己的量测内容相应的量测方法及量测仪器。对于土木工程学科领域的试验研究，结构试验的主要测量参数包括外部作用(主要是外荷载及支座反力等)和外部作用下的结构反应(如位移、挠度、应力、应变、曲率、裂缝、自振频率、振型、阻尼等)。这些量测数据的取得需要人们正确选择量测仪器和掌握量测方法的结果。

随着科学技术的不断进步，新的测量仪器也不断涌现，测量仪器朝着大数据量、快速、自动采集迈进。不管测量仪器如何发展，测量系统一般由感受、放大和显示三个基本部分组成。感受部分的敏感元件把从测点感受的微小信号传给放大部分，有时需要经过变换后传给放大部分，信号经放大部分放大后送至显示或记录部分。

测量技术的发展是一个从简单到复杂、从单一学科到各学科互相渗透、从低级到高级的过程。其中，用直尺量距离的方法可能就是一种最简单的测量技术；此后发展起来的机械式量测仪器是利用杠杆、齿轮、螺杆、弹簧、滑轮、指针、刻度盘等，将被测量值进行放大，转化为长度的变化，再以刻度的形式显示出来；随着电子技术的日新月异，结构试验越来越多地应用电测仪器，这些仪器能够将各种试验参数转变为电阻、电容、电压、电感等电量参数，然后加以测量，这种量测技术通常又被称为“非电量的电测技术”。目前，量测仪器的发展趋势主要体现在数字化与集成化两个方面，许多仪器均属声、光、电联合使用的复合式设备。

4.1.1 量测仪器的分类

在结构试验中，用于数据采集的仪器种类繁多，按它们的功能和作用情况可以分为传感器、放大器、显示器、记录器、分析仪器、数据采集仪或一个完整的数据采集系统等。仪器仪表还可以分为单件式和集成式，单件式仪器是指一个仪器只具有一个单一的功能，集成式仪器是指那些把多种功能集中在一起的仪器。

仪器仪表还可以按下列方法进行分类。

(1) 按仪器设备功能分类，可分为传感器、放大器、显示器、记录仪、分析仪器、数据采集仪。

(2) 按测试工作原理分类，可分为机械式仪器、电测仪器、光学测量仪器、复合式仪器、伺服式仪器等。

(3) 按仪器仪表用途分类，可分为测力传感器、位移传感器、应变计、倾角传感器、频率计、测振传感器。

(4) 按仪器仪表与结构关系分类，可分为附着式与手持式，接触式与非接触式，绝对式与相对式。

(5) 按仪器仪表显示与记录的方式分类，可分为直读式与自动记录式，模拟式与数字式。

4.1.2 主要技术指标

量测仪器的主要技术指标如下。

(1) 量程：仪器的测量上限值(最大值)与下限值(最小值)的代数差，即测量范围。通

常电测仪器的上限值与下限值附近测量误差较大，不宜在该区段内使用。

(2) 精确度(精度)：表示量测结果与真值的符合程度。它能够反映仪器所具有的可读数能力或最小分辨率。从误差观点来看，精度反映了量测结果中的各类误差，包括系统误差与偶然误差，因此，可以用绝对误差和相对误差来表示测量精度，在结构试验中，更多的用相对于满量程的百分数来表示测量精度。很多仪器的测量精度与最小分度值用相同的数值来表示。例如，千分表的测量精度与最小分度值均为 0.001mm。

(3) 刻度值：又称最小分度值，是指仪器显示器上最小刻度所代表的测量值。刻度值的倒数为该仪器的放大率。试验时根据被测参数所需的分位数选用适当的仪器。

(4) 灵敏度：被测参数(输入量)的单位增量引起仪器读数(输出量)的增量，即输出增量与输入增量之比。

(5) 重复性：测试系统重复测量某相同被测量值时，测试仪器输出值一致性的能力。

(6) 分辨率：使仪器输出量产生能观察出变化的最小被测量值。

(7) 滞后：仪表的输入量从起始值增至最大值的测量过程称为正行程，输入量由最大值减至起始值的测量过程称为反行程。同一输入量正反两个行程输出值间的偏差称为滞后。常以满量程中的最大滞后值与满量程输出值之比表示。

(8) 信噪比：仪器测得的信号中信号与噪声的比值称为信噪比，以杜比(dB)值来表示。这个比值越大，测量效果越好，信噪比对结构的动力特性测试影响很大。

(9) 稳定性：仪器受环境条件干扰影响后其指示值的稳定程度。

除了上述性能指标外，对于动力试验量测仪器仪表的传感器、放大器及显示记录仪器等各类仪表，还需考虑下述特性。

(1) 线性范围：测试系统输入和输出间关系曲线与选定工作直线的靠近程度。在动态量测中对仪表的线性度应严格要求，否则将对量测结构造成较大的误差。

(2) 频响特性：保持仪器在不同频率下灵敏度的变化特性，常以频响曲线(一般以对数频率值为横坐标，以相对灵敏度为纵坐标)表示。在进行高频动态量测时，应将使用频率限制在频响曲线的平坦部分以免引起过大的量测误差。对于传感器，提高其自振频率将有助于增加使用频率范围。

(3) 相移特性：振动参量经传感器转换成电信号或经放大、记录后在时间上产生的延迟称为相移。若相移特性随频率而变化，则对于不同频率成分的复合振动将引起输出电量的相位失真。常以仪器的相频特性曲线来表示其相移特性。在使用频率范围内，输出信号相对于信号的相位差应不随频率改变而变化。

此外，由传感器、放大器、记录器组成的整套量测系统，还需注意仪器相互之间的阻抗匹配及频率的配合等问题。

4.1.3　量测仪表的选用原则

在选用量测仪表时，应考虑下列要求。

(1) 符合量测所需的量程及精度要求。在选用仪表前，应先对被测值进行估算。一般应使最大被测值在仪器的 2/3 量程范围内，以防仪表超量程而损坏。同时，为保证量测精度，应使仪表的最小刻度值不大于最大被测值的 5%。

(2) 动态试验量测仪表，其线性范围、频响特性以及相移特性等都应满足试验要求。

(3) 对于安装在结构上的仪器或传感器，要求自重轻、体积小，不影响结构的工作。特别要注意夹具设计是否合理正确，不正确的安装将使试验结果产生较大的误差。

(4) 同一试验中选用的仪器仪表种类应尽可能少，以便统一数据的精度，简化量测数据的整理工作，避免差错。

(5) 选用仪表时应考虑试验的环境条件。例如，在野外试验时仪表常受到风吹日晒，周围的温、湿度变化较大，宜选用机械式仪表。此外，应从试验实际需要出发，选择仪器仪表的精度，切忌盲目选用高精度、高灵敏度的仪表。一般来说，测定结果的最大相对误差不大于5%即满足要求。

4.1.4 仪表的率定

为了确定仪表的精确度或换算系数，确定其误差，需将仪表表示值和标准量进行比较。这一工作称为仪表的率定。率定后的仪表按国家规定的精确度划分等级。

用于率定仪表的标准量应是经国家计量机构确认，具有一定精确度等级的专用率定设备产生的。率定设备的精确度等级应比被率定的仪器高。常用于率定液压试验机荷载度盘示值的标准测力计就是专用率定器。当没有专用率定设备时，可以用和被率定仪器具有同级精确度标准的“标准”仪器相比较进行率定。所谓标准仪器是指精确度不比被率定的仪器高，但不常使用，因而其度量性能保持不变，认为其精确度是已知的。此外，还可以利用标准试件来进行率定，即把尺寸加工非常精确的试件放在经过率定的试验机上加载，根据此标准试件及加载后产生的变化求出安装在标准件上的被率定仪表的刻度表。此法的准确度不高，但较简便，容易做到，所以常被采用。

为了保证量测的精确度，仪器的率定是一件十分重要工作。所有新生产或出厂的仪器都要经过率定。正在使用的仪器也必须定期进行率定，因为仪器经长期使用，其零件总有不同程度的磨损，或者损坏后经检修的仪器，零件的位置会有变动，难免引起示值的改变。仪器除需定期率定外，在重要的试验开始前，也应对仪表进行率定。

按国家计量管理部门规定，凡试验用量测仪表和设备均属于国家强制性计量率定管理范围，必须按规定期限率定。

4.2 应 变 量 测

结构在荷载作用下产生应力、应变。纤维应变可以通过应变仪直接测定，而应力目前大都通过被测结构材料的σ-ε曲线手工计算或仪器内部换算得到。此外，很多应变式传感器也是通过测定应变来指示力、位移、转角等物理量的。应变测量是结构试验的一项重要测试项目。

应变测量的方法和仪器很多，主要有电测与机测两类。机测是指机械式仪表，如双杠杆应变仪、手持式应变仪。机械式仪表适用于各种结构在长时间过程中的变形，无论是构件制作过程中变形的测量，还是结构在试验过程中变形的观察，均可采用。它特别适用于野外和现场作业条件下结构变形的测试。而电测法不仅具有精度高、灵敏度高、可远距离量测和多点量测、采集数据快速、自动化程度高等特点，而且便于将量测数据信号

和计算机或微处理机连接，为采用计算机控制和用计算机分析处理试验数据创造了有利条件。

4.2.1　电阻应变测试技术

1. 电阻应变计

1）电阻应变计的原理和构造

电阻应变计，又称电阻应变片，是电阻应变量测系统的感受元件。常见的电阻应变片如图 4－1 所示。

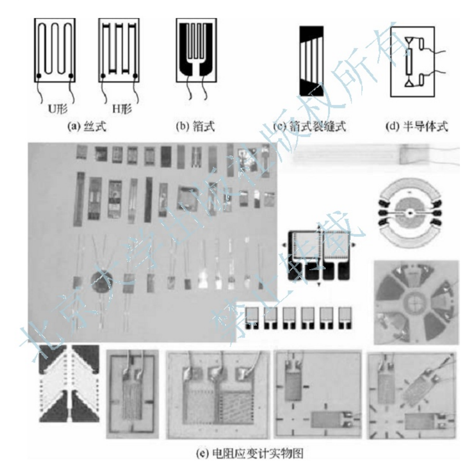


图 4－1　几种电阻应变计

对于单根电阻丝，由物理学可知：

$$R=\rho\frac{l}{A} \tag{4-1}$$

式中　R——电阻丝的电阻值(Ω)；

ρ——电阻丝的电阻率($\Omega\cdot mm^2/m$)；

l——电阻丝的长度(m)；

A——电阻丝的截面面积(mm^2)。

当金属导线沿其轴线方向受力变形时(伸长或缩短)，电阻值会随之发生变化(增大或减小)，这种现象就称为电阻应变效应。

可将上式两端先取对数后再微分，得

$$\frac{\mathrm{d}R}{R}=\frac{\mathrm{d}\rho}{\rho}+\frac{\mathrm{d}l}{l}-\frac{\mathrm{d}A}{A} \tag{4-2}$$

式中，$\frac{\mathrm{d}l}{l}$为纵向线应变ε，$\frac{\mathrm{d}A}{A}$表示金属丝长度变化时，由于横向效应而造成的截面的相对改变。对于圆截面直径为 D 的金属丝来说，若对其横截面面积的计算式 $A=\frac{\pi D^2}{4}$ 的两端先取对数再微分，则有

$$\frac{\mathrm{d}A}{A}=2\frac{\mathrm{d}D}{D}$$

由材料泊松比 μ，得

$$\frac{\mathrm{d}D}{D}=-\mu\frac{\mathrm{d}l}{l}=-\mu\varepsilon$$

将上式代入式(4-2)，得

$$\frac{\mathrm{d}R}{R}=\frac{\mathrm{d}\rho}{\rho}+\varepsilon+2\mu\varepsilon \tag{4-3}$$

令 $K_0=\frac{\mathrm{d}\rho/\rho}{\varepsilon}+1+2\mu$，则

$$\frac{\mathrm{d}R}{R}=K_0\varepsilon \tag{4-4}$$

对大多数金属丝而言，$\frac{\mathrm{d}\rho/\rho}{\varepsilon}$ 和 μ 在一定应变范围内是一个常数，故 K_0 是一个常数，称为金属单丝灵敏系数。K_0 的物理意义是单位伸缩应变引起的电阻值相对变化。式(4-4)建立了电学量与力学量之间的关系，是用应变计测量应变的理论基础。

如果将电阻丝牢牢粘贴在试件测点上，随测点而变形，那么由式(4-4)可知，电阻丝的阻值相对变化就能反映出测点应变，且呈线性关系。为了获得足够大的阻值变化，常将一定长度的电阻丝做成栅状(称敏感栅)的应变计，用于测量试件的应变。

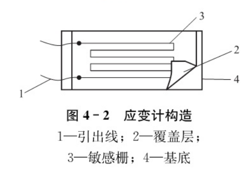


图 4-2　应变计构造

1—引出线；2—覆盖层；3—敏感栅；4—基底

栅状应变计一般包括敏感栅、基底与覆盖层、粘结剂、引线四部分，如图 4-2 所示。敏感栅是应变计的主要部分，由金属丝或箔制成，敏感栅通过粘结剂固定于应变计的基底与覆盖层之间，由引线引出。基底与覆盖层对敏感栅起固定、保护和绝缘作用。

对于应变计，式(4-4)可写为

$$\frac{\mathrm{d}R}{R}=K\varepsilon \tag{4-5}$$

式中　K——应变计的灵敏系数，是常数。

双向应变场下，由于应变计的横向效应，使得应变计的灵敏系数 K 一般比单丝灵敏系数 K_0 要小，应变计的灵敏系数 K 按单向应力场由厂家抽样试验确定，一般约为 2.0。

2）电阻应变计的分类、技术指标和选用

电阻应变计的种类很多，图 4-1 示出一部分。按丝栅材料分为金属电阻应变计和半导体应变计两类。金属电阻应变计根据生产工艺不同又分为金属丝式应变计、箔式应变计。按基底材料分有纸基电阻应变计、胶基电阻应变计等。按使用温度分为低温电阻应变

计、常温电阻应变计、高温电阻应变计等。为了方便测量主应变大小及方向，除了有单栅单向应变计之外，还有双栅双向及三栅三向应变计(也称应变花)，如图 4－3 所示。金属丝式应变计是用直径很细的金属电阻丝做成敏感栅，基底及覆盖层多为纸质，常用的有 U 形和 H 形。H 形应变计是将 U 形应变计栅端的半圆弧部分改为较粗的直丝，以减小应变计的横向效应。它具有价格低、易于粘贴、耐疲劳性差等特点。

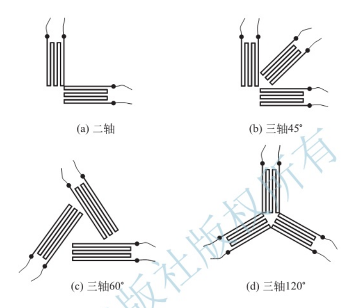


图 4－3　几种应变花

箔式应变计敏感栅是由镀在胶质基底上的金属箔通过光刻和腐蚀工艺制成的，覆盖层也为胶质。由于敏感栅的横向部分做得较宽，因此其横向效应小。此外，它还具有绝缘度高、耐疲劳性好的特点。

半导体应变计的敏感元件都是由半导体材料制成，它的特点是灵敏度高，频率响应好，稳定性相对较差。

应变计的主要技术指标如下。

(1) 标距 l，即敏感栅的有效长度，一般为 2～120mm。由于应变计测得的应变值是整个标距范围内的平均应变，因此，测点附近应变梯度大时应用小标距应变计，非匀质材料试件(如混凝土、铸铁、铸钢等)应选用大标距应变计，对于混凝土试件，标距应大于骨料粒径的 4 倍。

(2) 栅宽 b，以毫米(mm)计。

(3) 电阻值 R，一般为 120Ω，与应变仪配套使用。应变仪均按 120Ω 设计，对于非 120Ω 应变计，应按应变仪说明书调整。

(4) 灵敏系数 K，一般为 2.0 左右。应变仪灵敏系数应与应变计灵敏系数相同，使用时，可调节应变仪灵敏系数调节使其相同。

3) 电阻应变计的粘贴技术

电阻应变计用粘结剂直接粘贴在试件测点上，随测点而变形，并反映测点应变。因此，粘贴质量好坏直接影响测量结果的可靠性。粘贴质量好坏取决于粘结剂和粘贴技术水平，应变计粘贴必须严格按照粘贴工艺程序操作。

粘结剂分为水剂和胶剂。匀质材料上粘贴应变计均采用氰基丙烯酸类水剂，如

KH501、KH502 快速胶；在混凝土等非匀质材料上常用环氧树脂胶。粘结剂要求有足够的抗拉和抗剪强度，蠕变小，电绝缘性能好，化学稳定性及工艺性好，温湿度影响小。

应变计粘贴工艺程序如下：应变计检查、分选→试件表面处理→粘贴应变计→固化处理→粘贴质量检查→导线连接→防潮防护。

(1) 应变计检查、分选。外观检查主要是用放大镜检查应变计内有无气泡、霉点等缺陷；阻值检查是用万用表检查有无短路或断路，用电桥测量应变计的阻值，同一测区使用的应变计阻值相差应不大于 0.5Ω。

(2) 试件表面处理。对钢材试件应除锈后打磨，最好用 0 号砂纸打磨出 45°交叉斜纹，然后用丙酮或酒精清洗干净；对混凝土试件，在测点范围内不能有麻面、气孔和浮浆等。在测点区用砂轮或砂纸将表面磨光，清除浮尘，再用环氧树脂胶涂一层 0.05～0.1mm 的防潮层打底，待底层完全固化后，再用砂纸磨平，最后用丙酮或酒精清洗干净。

(3) 粘贴应变计。在测点位置画出定位轴线，用手捏住应变计的引线，在应变计的背面(基底一侧)均匀涂一层粘结剂或 502 胶水，然后将应变计放在测点上，方向对正。在应变计上覆盖一小片玻璃纸，用手由一端向另一端轻轻滚压，挤出多余的胶水和气泡，然后用手轻按 1～2min，待胶水初步固化后松手并揭下玻璃纸。

(4) 固化处理。粘贴后必须使粘结剂充分干燥、固化，以保证传递测点变形和绝缘度达标。自然干燥两天左右，当温度太低时，可用红外线灯烘烤，以加速固化。

(5) 导线连接。检查合格后，用胶水固定端子，接线端子应尽量靠近应变计引线引出点，以防引线与试件接触，然后用电烙铁及焊接剂将引线与导线焊在端子上，引出导线。

(6) 粘贴质量检查。外观检查应变计与试件之间应无气泡。用万用表检查应变计应无短路和断路，粘贴前后的电阻值应相同。用兆欧表检查应变计引线与试件之间“对地电阻”，静载测量应高于 200MΩ，长期测量或要求较高的测量应高于 500MΩ，动载测量可略低于 200MΩ。

(7) 防潮防护。为防止潮湿侵害应变计，一般用防潮层打底，这一工作在测点表面处理时进行。此外，长期观测或隔一段时间测量时应设防护、防潮层，即在应变计上涂防护、防潮材料，以防止应变计受机械损伤或潮湿侵害。防护防潮材料可用环氧树脂，防潮材料可用无水凡士林石蜡合剂等。

2. 电阻应变的测量原理

1) 电阻应变仪的工作原理

电阻应变仪利用惠斯顿电桥将应变计产生的电阻变化率[由应变造成，见式(4-5)] 转换成电信号，经放大器放大后显示成应变读数。惠斯顿电桥如图 4-4 所示。应变仪电桥的输出端连接到放大器的输入端，如果放大器的输入阻抗很大，可以近似认为电桥输出端是开路的，这种电桥称为电压桥。由电工学可知，电桥输出电压 U_{BD} 为：

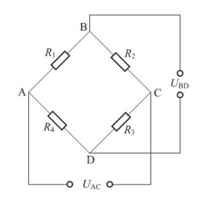


图 4-4 惠斯顿电桥

$$U_{BD}=\frac{R_1R_3-R_2R_4}{(R_1+R_2)(R_3+R_4)}\cdot U_{AC} \tag{4-6}$$

当

$$R_1\cdot R_3=R_2\cdot R_4 \tag{4-7}$$

电桥输出电压 $U_{BD}=0$，此时称电桥处于平衡状态，式(4－7)为电桥平衡条件。

假设初始状态为平衡状态，受力后桥臂电阻分别有微小的电阻增量 ΔR_1、ΔR_2、ΔR_3 和 ΔR_4，这时电桥输出电压的增量 ΔU_{DB} 为

$$\Delta U_{BD}=U_{AC}\left[\frac{R_1R_2}{(R_1+R_2)^2}\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}-\frac{\Delta R_2}{R_2}\right)+\frac{R_3R_4}{(R_3+R_4)^2}\left(\frac{\Delta R_3}{R_3}-\frac{\Delta R_4}{R_4}\right)\right] \tag{4-8}$$

2）测量电路

根据桥臂上工作应变片的数量，测量方式主要有全桥电路、半桥电路和 1/4 桥电路。

(1) 全桥电路。全桥电路就是在量测桥的四个桥臂上全部接入工作应变片，其中相邻臂上的工作片兼做温度补偿片。现假定选取的四个桥臂应变片阻值相等，即 $R_1=R_2=R_3=R_4$，且每个应变片的灵敏系统 K 也相同，则式(4－8)变为

$$\Delta U_{BD}=\frac{U_{AC}}{4}\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}-\frac{\Delta R_2}{R_2}+\frac{\Delta R_3}{R_3}-\frac{\Delta R_4}{R_4}\right)=\frac{U_{AC}K}{4}(\varepsilon_1-\varepsilon_2+\varepsilon_3-\varepsilon_4) \tag{4-9}$$

(2) 半桥电路。当图 4－4 中 R_1 和 R_2 为应变片，试样受载变形后产生的电阻增量为 ΔR_1 和 ΔR_2，而 R_3 和 R_4 为固定电阻不感受变形时，由式(4－9)得输出桥压为

$$\Delta U_{BD}=\frac{U_{AC}}{A}\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}-\frac{\Delta R_2}{R_2}\right)=\frac{U_{AC}K}{4}(\varepsilon_1-\varepsilon_2) \tag{4-10}$$

(3) 1/4 桥电路。当图 4－4 中 R_1 为应变片，试样受载变形后产生的电阻增量为 ΔR_1，而 R_2、R_3 和 R_4 为固定电阻不感受变形时，由式(4－9)得输出桥压为

$$\Delta U_{BD}=\frac{U_{AC}}{4}\frac{\Delta R_1}{R_1}=\frac{U_{AC}K}{4}\varepsilon_1 \tag{4-11}$$

3）温度补偿

贴在试件测点上的应变计总处在温度场中，当温度变化时，应变计的阻值也随之变化；此外，当应变计的线胀系数与试件材料线胀系数不同时，应变计受到的拉力或压力也会造成阻值变化。由于温度变化造成上述应变计阻值变化，进而使应变仪应变读数发生变化，这种现象称为应变计的温度效应。由于温度效应产生的虚假应变称为视应变。视应变非受力引起，必须设法消除。消除温度效应影响的措施称为温度补偿。温度补偿可采用温度补偿片法、工作片互补法和温度自补偿片法三种。

(1) 温度补偿片法。如图 4－5 所示，将 R_1 贴在试件测点上，感受机械应变，该应变计称为工作片，将 R_2 贴在材料相同但不受力的块体上，并与试件放在一起，使其处于同一温度场。R_2 不受力，只感受温度，提供温度补偿，故称为(温度)补偿片。由于工作片与补偿片处于同一温度场，温度造成的视应变始终相同；又由于工作片与补偿片接在桥臂的相邻位置，根据式(4－9)可知，两个应变计产生的视应变相互抵消，不会造成电桥电压输出，即温度效应被消除(补偿)。

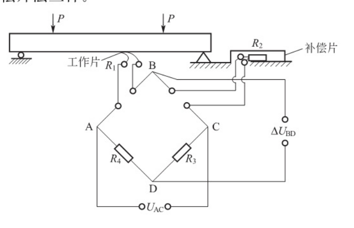


图 4－5　温度补偿应变片法桥接连接示意

工作片与补偿片必须是同规格应变计，即它们的灵敏系数、阻值、温度系数相同，最好采用同一批次。一个补偿片可以补偿一个工作片，称单点补偿；一个补偿片也可以补偿

多个工作片，称多点补偿。被补偿的工作片数量根据试件材料和测量要求而定。钢材一般可用一个补偿 10 个；混凝土导热性能差些，一个补偿片补偿的工作片数量不宜超过 5 个，否则补偿片连续工作，其温度会逐渐高于工作片，从而失去补偿作用。测量精度要求高的最好单点补偿。

(2) 工作片互补法。如图 4－6 所示，将机械应变相同但符号相反的两个应变测点分别贴上两个工作片，并分别接于相邻的桥臂 AB、BC 上。由于两个工作片处于桥臂的相邻位置，由式(4－9)可知，温度产生的视应变相互抵消，无电桥电压输出，因而温度效应得到补偿。又由于两个工作片的机械应变大小相等符号相反，即 $\varepsilon_1=-\varepsilon_2$，所以应变仪读数 $\varepsilon_r=2\varepsilon_1$。由此可见，只要能预先知道各工作片所感受的机械应变之间的关系，并将互补偿的两工作片接于相邻桥臂，应变即可测得，温度效应得到补偿。这类电桥接法称为工作片互补偿，它既能起温度补偿作用，又能提高电桥的灵敏度。但图 4－6 所示接法不适用于混凝土等非匀质材料。

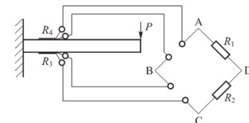


图 4－6　工作应变片温度互补法桥路示意

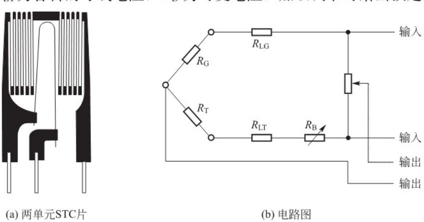
以上两种方法都是通过桥路连接方法实现温度补偿的，统称为桥路补偿法。

(3) 温度自补偿应变片法。当找不到一个适当位置来安装温度补偿片，或者工作片与补偿片的温度变动不相等时，应采用温度自补偿(STC)应变片。现有的 STC 片的基本形式分为两单元片、一单元片和通用型 STC 片三种。

两单元 STC 片由两组金属丝栅串联组成。其中一组有负的电阻温度系数，另一组有正的电阻温度系数。调整两组丝栅的长度，使其净电阻温度系数能抵消由于应变片贴在特定材料上因膨胀系数不一致而引起的电阻变化。这种应变片是为具有相应膨胀系数的材料专门设计的。

一单元 STC 片中电阻丝栅的制作，要求其使特定电阻所引起的电阻变化恰好与因应变片与试件的线膨胀系数不同而引起的阻值变化大小相等，符号相反。

通用型 STC 片是一种单元片，它可由两个单元组成，如图 4－7(a)所示，两个单元的相应效应可以通过改变外电路来调整，如图 4－7(b)所示。其中 R_G 和 R_T 互为工作片和补偿片，R_{LG}和 R_{LT}为各自的导线电阻，R_B 为可变电阻，加以调节可给出预定的最小视应变。



(a) 两单元STC片　　(b) 电路图

图 4－7　STC 片

R_T—补偿电阻；R_G—工作电阻；R_{LT}—补偿臂导线电阻；R_{LG}—工作臂导线电阻；R_B—镇流电阻器

4）多点测量线路

进行实际测量时，一般要求应变仪具有多个测量桥，这样就可以进行多测点的测量工作。图4－8所示是实现多点测量的两种线路：工作肢转换法和中线转换法。工作肢转换法每次只切换工作片，温度补偿片为共用片；中线转换法每次同时切换工作片和补偿片，通过转换开关自动切换测点而形成测量桥。

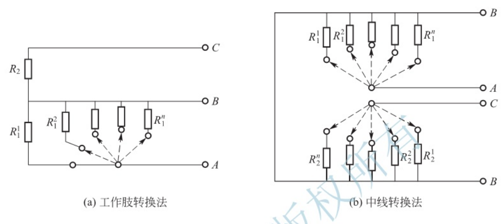


图4－8　实现多点测量的两种线路

4.2.2　应变的其他量测方法与仪器

1. 手持应变仪

手持应变仪如图4－9所示，它是一台自成套的应变仪，主要由两片弹簧钢片连接两个刚性骨架组成，两个骨架可做无摩擦的相对移动。骨架两端附带有锥形插轴，进行测量时将锥形插轴插入结构表面预定的空穴里。结构表面的预定空穴应按照仪器插轴之间的距离进行设置，这个距离就是仪器的标距。试件的伸长或缩短量由装在骨架上的千分表来测读。

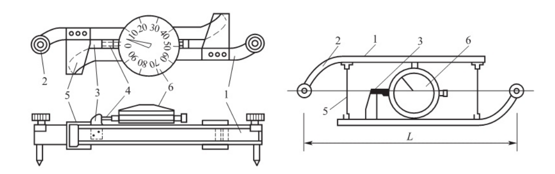


图4－9　手持应变仪

1—刚性骨架；2—插轴；3—骨架外凸缘；4—千分表测杆；5—薄钢片；6—千分表

手持应变仪常用于现场测量，适用于测量实际结构的应变，标距为50～250mm。国产手持应变仪有200mm和250mm两种。由于标距不同，其上千分表每一刻度代表的应变值也不相同。一般大标距适于量测非匀质材料的应变。

手持应变仪的工作原理是：在标距两端黏结两个脚标(每边各一个)，通过测量结构变形前后两个脚标之间距离的改变，求得标距内的平均应变。

手持应变仪的操作步骤如下：①根据试验要求确定标距，在标距两端黏结两个脚标(每边各一个)；②结构变形前，用手持应变仪先测读一次；③结构变形后，再用手持应变仪测读；④变形前后的读数差即为标距两端的相对位移，由此可求得标距范围内的平均应变。

手持应变仪的主要优点是，仪器不需要固定在测点上，因而一台仪器可进行多个测点的测量；其缺点是每测读一次要重新变更一次位置，这样很可能引入较大的误差。因此，为减小测量误差，在整个测试过程中，最好每个操作者固定一台仪器，并保持读数方法和测试条件前后一致，这样读数误差可以降至最低。尽管手持应变仪的测量误差偏大，但当用于测量混凝土构件的长期应变(徐变)、墙板的剪切变形以及在大标距范围内进行其他类似的应变测量时，手持应变仪还是相当方便的。

2. 千分表测应变装置

图 4－10 所示是一个自制的应变测量装置，它有两个粘贴在试件上的脚座，分别固定千分表和刚性杆，测量标距可通过调节两个脚座的距离任意确定。构件伸长(缩短)量由千分表读出，除以标距即算得应变。

它的特点是装置构造简单、价廉，测量精度较高，可重复利用。但由于脚座较长，不适合测量有弯曲变形的构件。

3. 单杠杆、双杠杆应变仪

图 4－11 所示是一个单杠杆应变仪，构件变形后活动刀口绕 B 点转动，经杠杆放大后由千分表读出应变。其特点是仪器构造简单、价廉，测量误差相对较大；标距越小放大倍数越小，适合于大标距测量。

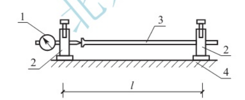


图 4－10　千分表测应变装置

1—千分表；2—表座；3—刚性杆；4—试件

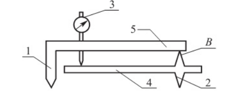


图 4－11　单杠杆应变仪

1—固定刀口；2—活动刀口；3—千分表；4—杠杆；5—刚性杆

为适应小标距测量，同时加大放大倍数，可采用双杠杆应变仪，如图 4－12 所示。

4. 振弦式应变计

图 4－13 所示为振弦式应变计原理图，活动脚座随试件位移，钢弦绷紧(松弛)造成钢弦频率改变，在一定范围内频率改变量与位移呈线性关系，由此求出位移进而求出应变。振弦式应变计工作稳定、可靠，测量不受长导线影响，测量有弯曲变形的构件需要进行修正。

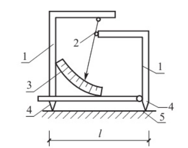


图 4－12　双杠杆应变仪
1—杠杆；2—指针杠杆；3—刻度盘；
4—插脚；5—试件

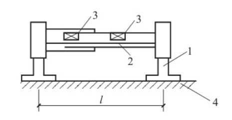


图 4－13　振弦式应变计
1—脚座；2—钢弦；3—激振与电感；
4—试件

5. 光测法

除以上应变测量方法外，在土木工程结构试验中还有光测法(云纹法、激光衍射法、光弹法)等。光测法较多应用于节点或构件的局部应力分析。

除了上述常用的一些方法外，也可利用各种放大原理自制一些简单实用的测量装置。

4.3　位移与变形量测

结构位移是结构承受荷载作用后的最直观反应，结构在局部区城内的屈服变形、混凝土局部范围内的开裂以及钢筋与混凝土之间的局部粘结滑移等变形，都可以在荷载-位移曲线上得到反映，它反映了结构的整体变形，还可区分结构的弹性和非弹性性质，位移测定对分析结构性能至关重要。总的来说，结构的位移主要是指构件的挠度、侧移、转角、支座偏移等参数，可分为线位移和转动变形两种。量测位移的仪器有机械式、电子式及光电式等多种。其中，机械式仪表主要包括结构试验中常用的接触式位移计(千分表、百分表、挠度计)，以及桥梁试验中常用的千分表引伸仪和绕丝式挠度计。而电子式仪表则包括广泛采用的应变梁式位移传感器、滑线电阻式位移传感器和差动变压器式位移传感器等。

4.3.1　线位移量测

1. 接触式位移计

接触式位移计为机械式仪表，其构造如图 4－14 所示。它主要由测杆、齿轮、指针和弹簧等机械零件组成。测杆的功能是感受试件变形；6、7、8 齿轮是将感受到的变形加以放大或变换方向；测杆弹簧可使测杆紧随试件的变形，并使指针自动返回原位。扇形齿轮和螺旋弹簧的作用是使齿轮 6、7、8 相互之间只有单面接触，以消除齿隙所造成的无效行程。

接触式位移计根据刻度盘上最小刻度值所代表的量分为百分表(刻度值为 0.01mm)、千分表(刻度值为 0.001mm)和挠度计(刻度值为 0.05mm 或 0.1mm)。

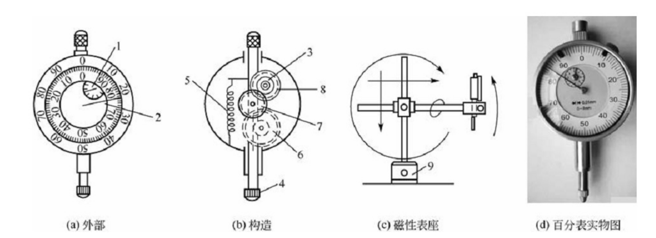


图 4－14　百分表构造及实物

1—短针；2—长针；3—齿轮弹簧；4—测杆；5—测杆弹簧；6、7、8—齿轮；9—表座

接触式位移计的度量性能指刻度值、量程和允许误差。一般百分表的量程为 5mm、10mm、30mm，允许误差为 0.01mm。千分表的量程为 1mm，允许误差为 0.001mm。挠度计量程为 50mm、100mm、300mm，允许误差为 0.05mm。

使用时，将位移计安装在磁性表架上，用表架横杆上的颈箍夹住位移计的颈轴，并将测杆顶住测点，使测杆与测面保持垂直。表架的表座应放在铁磁性相对静止的点上，打开表座上的磁性开关固定表座。

2. 应变梁式位移传感器

应变梁式位移传感器的主要部件是一块弹性好、强度高的铍青铜制成的悬臂弹性簧片如图 4－15 所示，簧片一端固定在仪器外壳上。在簧片上粘贴四片应变片，组成全桥或半桥测量线路，簧片的自由端固定有拉簧，拉簧与指针固结。当测杆跟随变形而移动时，传

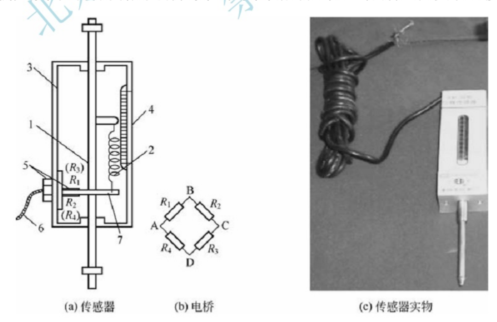


图 4－15　电阻应变式位移传感器

1—测杆；2—弹簧；3—外壳；4—刻度；5—电阻应变计；6—电缆；7—悬臂梁

力弹簧使簧片产生挠曲，簧片产生应变，通过电阻应变仪测得的应变即可反映与试件位移间的关系。

这种位移传感器的量程为 30～150mm，读数分辨率可达 0.01mm。由材料力学得知，位移传感器的位移 δ 为

$$\delta=\varepsilon C \tag{4-12}$$

式中　δ——铍青铜梁上的应变，由应变仪测定；

　　C——与簧片尺寸及拉簧材料性能有关的刚度系数。

梁上四片应变片，按图 4－15 所示贴片位置和接线方式，取 $\varepsilon_1=\varepsilon_3=\varepsilon$；$\varepsilon_2=\varepsilon_4=-\varepsilon$，则桥路对角线输出为

$$\Delta U_{BD}=\frac{U_{AC}}{4}K(\varepsilon_1-\varepsilon_2+\varepsilon_3-\varepsilon_4)=\frac{U_{AC}}{4}K\varepsilon\cdot 4 \tag{4-13}$$

由此可见，采用全桥接线且贴片符合图中位置时，桥路输出灵敏度最高，应变被放大了 4 倍。

3. 滑动电阻式位移传感器

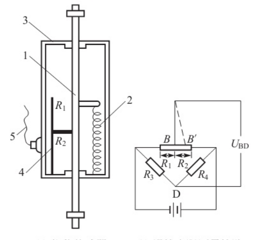
滑线电阻式位移传感器由测杆、滑线电阻和触头等组成，构造与测量原理如图 4－16 所示。滑线电阻固定在表盘内，触点将电阻分成 R_1 及 R_2。工作时将电阻 R_1 和 R_2 分别接入电桥桥臂，预调平衡后输出为零。当测杆向下移动一个位移 δ 时，R_1 增大 ΔR_1，R_2 减小 ΔR_1。由相邻两臂电阻增量相减的输出特性可知：

$$\Delta U_{BD}=\frac{U_{AC}}{4}\frac{\Delta R_1-(-\Delta R_1)}{R}=\frac{U_{AC}}{4}K\varepsilon\cdot 2 \tag{4-14}$$

采用这样的半桥接线，其输出量与电阻增量(或与应变)成正比，即与位移成正比。量程可达 10～100mm。

4. 线性差动电感式位移传感器

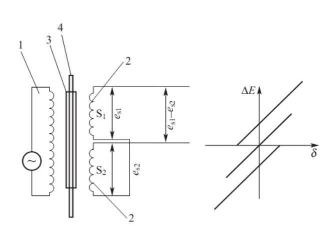
图 4－17 所示为差动变压器式位移传感器的构造原理图。它由一个初级线圈和两个次



(a) 位移传感器　(b) 滑线电阻测量线路

图 4－16　滑动电阻式位移传感器

1—测杆；2—弹簧；3—外壳；
4—电阻丝；5—电缆



(a) 构造原理　(b) ΔE－δ 关系曲线

图 4－17　线性差动电感式位移传感器

1—初级线圈；2—次级线圈；
3—圆形筒；4—铁心

级线圈分内外两层同绕一个圆筒上，圆筒内放一能自由上下移动的铁心。对初级线圈加入激励电压时，通过互感作用使次级线圈感应而产生电势。当铁心居中时，感应电势 $e_{s1}-e_{s2}=0$，无输出信号。铁心向上移动一个位移 δ，这时 $e_{s1}\neq e_{s2}$，输出为 $\Delta E=e_{s1}-e_{s2}$。铁心向上移动的位移越大，ΔE 也越大。反之，当铁心向下移动时，e_{s1} 减小而 e_{s2} 增大，所以 $e_{s1}-e_{s2}=-\Delta E$。因此其输出量与位移成正比。由于输出量为模拟量，当需要知道它与位移的关系时，应通过率定确定。图 4-17(b)中的 $\Delta E-\delta$ 直线是率定得到的一组标定曲线。这种传感器的量程大，可达 500mm，适用于整体结构的侧移测量。

5. 其他位移测量仪器及装置

对于大型结构构件如桥梁等，当位移较大、测量精度要求不高时，可用挠度计(图 4-18)、连通管(图 4-19)进行测量，也可用水准仪、经纬仪及直尺进行测量，其精度不如上述各类位移传感器，一般为 0.1～1mm。连通管是一种简单装置，将连通管注水，则各竖向管水位在一个平面内，试件变形后水位仍在一个平面内，可利用试件变形前后水位在标尺上的读数变化，求得试件挠度。

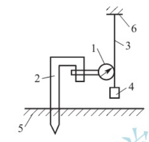


图 4-18 挠度计测量装置

1—挠度计；2—挠度计支架；3—钢丝；4—重锤；5—地面；6—试件

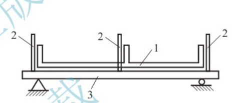


图 4-19 连通管测量装置

1—连通管；2—标尺；3—试件

4.3.2 角位移量测

除应变和线位移外，结构反应中还有转角、曲率变化、相对滑移等。角位移传感器附着在结构上，随着结构一起发生位移。常用的角位移传感器有水准式倾角仪和电子倾角仪。

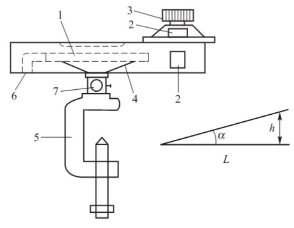


图 4-20 水准式倾角仪

1—水准管；2—刻度盘；3—微调螺栓；4—弹簧片；5—夹具；6—基座；7—活动铰

1. 水准式倾角仪

图 4-20 所示为水准式倾角仪的构造。水准管 1 安置在弹簧片 4 上，一端铰接于基座 6 上，另一端被微调螺栓 3 顶住。当仪器用夹具 5 安装在测点上后，用微调螺栓使水准管的气泡居中，结构变形后气泡漂移，再扭动微调螺栓使气泡重新居中，度盘前后两次读数的差即为测点的转角：

$$\alpha=\arctan\frac{h}{L} \qquad (4-15)$$

式中　L——铰接基座与微调螺栓顶点之间的距离；

h——微调螺栓顶点前进或后退的位移。

仪器的最小读数可达 1″～2″，量程为 3°。其优点是尺寸小、精度高；缺点是受湿度及振动影响大，阳光下曝晒会引起水准管爆裂。

2. 电子倾角仪

电子倾角仪是通过电阻变化测定结构某部位的转动角度，仪器的构造原理如图 4-21 所示。其主要装置是一个盛有高稳定性的导电液体的玻璃器皿，在导电液体中插入三根电极 A、B、C 并加以固定。电极等距离设置且垂直于器皿底面，当传感器处于水平位置时，导电液体的液面保持水平，三根电极浸入液内的长度相等，故 A、B 极之间的电阻值等于 B、C 极之间的电阻值，即 $R_1=R_2$。使用时将倾角仪固定在试件测点上，试件发生微小转动时倾角仪随之转动。因导电液面始终保持水平，因而插入导电液体内的电极深度必然发生变化，使 R_1 减小 ΔR，R_2 增大 ΔR。若将 AB、BC 视作惠斯顿电桥的两个臂，则建立电阻改变量 ΔR 与转动角度 θ 间的关系就可以用电桥原理测量和换算，即 $\Delta R = K\theta$。

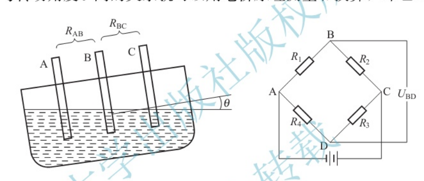


图 4-21　电子倾角仪构造原理

3. 其他变形测量仪器

其他变形量测仪器基本上均由前述基本仪表和各类转换元器件配以不同的附件及夹具组成。常用的变形测量仪器有杠杆式测角器、曲率计、扭角计等。

1) 杠杆式测角器

杠杆式测角器构造示意如图 4-22 所示，将刚性杆 1 固定在欲测试件 2 的测点上，结构变形带动刚性杆转动，用位移计测出 A、B 两点位移，即可算出转角 α：

$$\alpha=\arctan\frac{\Delta_1-\Delta_2}{L} \tag{4-16}$$

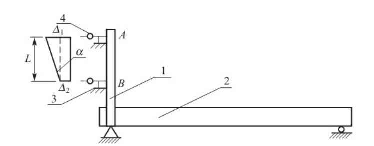


图 4-22　用位移计测定梁支座截面转角

1—刚性杆；2—试件；3—位移计支架；4—位移计

当 $L=100\text{mm}$，位移计刻度差值为 0.1mm 时，则可测得转角值为 1×10^{-3} 弧度，具有足够的精度。

2）曲率计

受弯构件的弯矩-曲率关系是反映构件变形性能的主要指标。当构件表面变形符合二次抛物线时，可以根据曲率的数学定义，利用构件表面两点的挠度差，近似计算测区内构件的曲率。

如图 4-23(a)所示，一根金属杆上有两个刀口，A 为固定刀口、B 为可移动刀口；百分表安装于 D 点，选定标距 AB 并使其距离不因构件的变形而改变。设构件的变形符合如下的二次抛物线方程：

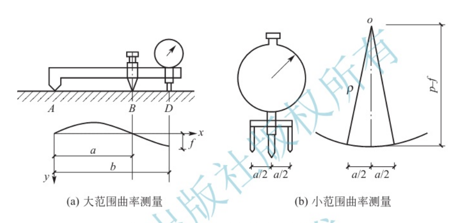


图 4-23　用位移计测曲率的装置

$$y=c_1x^2+c_2x+c_3 \tag{4-17}$$

则根据曲率公式，构件的曲率 k 为

$$|k|=\frac{1}{\rho}=\frac{|y''|}{(1+y'^2)^{3/2}} \tag{4-18}$$

对于大多数小变形受弯构件，转角均很小，故有 $|y'|\ll1$，因此 $|k|\approx|y''|=2|c_1|$。将 A、B、D 点的边界条件代入式(4-17)，得

$$c_3=0 \quad c_1a^2+c_2a=0 \quad c_1b^2+c_2b=f \tag{4-19}$$

解方程组式(4-19)可得出 c_1、c_2：

$$c_1=\frac{f}{b(b-a)} \qquad c_2=\frac{af}{b(a-b)}$$

将 c_1、c_2 代入式(4-18)，得

$$|k|=\frac{1}{\rho}=\frac{2f}{b(b-a)} \tag{4-20}$$

对于薄板曲率的测定方法如图 4-23(b)所示。假定薄板变形曲线近似为球面，且当薄板的挠度 f 远远小于测点标距 a 时，有：

$$\frac{1}{\rho}=\frac{8f}{a^2} \tag{4-21}$$

3）扭角计

图 4-24 所示是利用位移计量测扭角的装置，用它可近似测定空间壳体受到扭

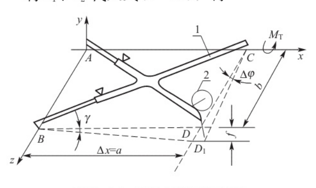


图 4-24　千分表测扭角装置

1—刚架支架；2—千分表

转后单位长度的相对扭角：

$$\theta=\frac{d\varphi}{dx}=\frac{\Delta\varphi}{\Delta x}=\frac{f}{ba} \tag{4-22}$$

4）剪切变形的量测

梁柱节点或框架节点的剪切变形，可用百分表或手持式应变仪测定其对角线上的伸长或缩短量，并按经验公式求得剪切变形 γ。当采用图 4－25(a)所示的测量方法时，剪切变形按式(4－23a)计算；采用图 4－25(b)所示的测量方法时，按式(4－23b)计算：

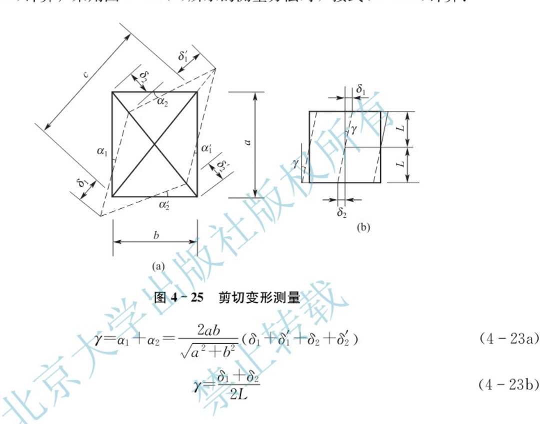


图 4－25　剪切变形测量

$$\gamma=\alpha_1+\alpha_2=\frac{2ab}{\sqrt{a^2+b^2}}(\delta_1+\delta_1'+\delta_2+\delta_2') \tag{4-23a}$$

$$\gamma=\frac{\delta_1+\delta_2}{2L} \tag{4-23b}$$

4.3.3　光纤位移传感器

光纤位移传感器是 20 世纪 70 年代中期发展起来的一门新技术，光纤最早用于通信，随着光纤技术的发展，光纤传感器得到进一步发展。与其他传感器相比较，光纤位移传感器有不受电磁干扰，防爆性能好，不会漏电打火；可根据需要做成各种形状，可以弯曲；耐高温、耐高压、绝缘性能好；耐腐蚀等优点。本节介绍光纤的结构、传输原理、光纤传感器类型，以及反射式光纤位移传感器的原理和应用。

1. 光纤结构和传输原理

1）光纤结构

光导纤维，简称光纤，目前基本采用石英玻璃，有不同掺杂。光纤结构主要由纤芯、包层和护套三部分组成，如图 4－26 所示。光纤的导光能力取决于纤芯和包层的性质，纤芯的折射率 N_1 略大于包层折射率 N_2。

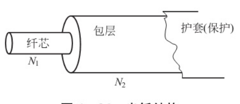


图 4－26　光纤结构

2）光纤的传输原理

光在空间是直线传播的，在光纤中光被限制在光纤中，并能随光纤传递到很远的距离。图4－27给出了光纤传光示意图，光纤的传播是基于光的全反射。当光线以不同角度入射到光纤端面时，在端面发生折射后进入光纤，进入光纤后入射到纤芯（光密介质）与包层（光疏介质）交界面，一部分透射到包层，一部分反射回纤芯。但是，当光线在光纤端面中心的入射角θ减小到某一角度θ_c时，光线全部反射。光被全反射时的入射角θ_c称为临界角，只要$\theta>\theta_c$，光在纤芯和包层界面上经若干次全反射向前传播，最后从另一端面射出。

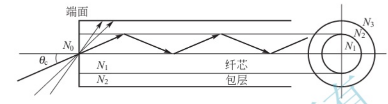


图4－27　光纤传光示意

为保证全反射，必须满足全反射条件$\theta>\theta_c$。由斯涅尔（Snell）折射定律可导出光线由折射率为N_0处介质射入纤芯时，实现全反射的临界入射角为

$$\theta_c=\arcsin\left(\frac{1}{N_0}\sqrt{N_1^2-N_2^2}\right) \tag{4-24}$$

对外介质为空气时，$N_0=1$，则：

$$\theta_c=\arcsin\left(\sqrt{N_1^2-N_2^2}\right) \tag{4-25}$$

可见，光纤临界入射角的大小是由光纤本身的性质（N_1、N_2）决定的，与光纤的几何尺寸无关。

2. 光纤性能

1）数值孔径

临界入射角θ_c的正弦函数定义为光纤的数值孔径（NA）：

$$NA=\sin\theta_c=\frac{1}{N_0}\sqrt{N_1^2-N_2^2} \tag{4-26}$$

空气中：

$$NA=\sin\theta_c=\sqrt{N_1^2-N_2^2} \tag{4-27}$$

NA表示光纤的集光能力，无论光源的发射功率有多大，只有在$2\theta_c$张角之内的入射光才能被光纤接收、传播。若入射角超出这一范围，光线会进入包层漏光。一般NA越大集光能力越强，光纤与光源间耦合会更容易。但NA越大，光信号畸变越大。

2）光纤模式

光纤模式（V）是指光波沿光纤传播的途径和方式，不同入射角度光线在界面上反射的次数不同，光波之间的干涉产生的强度分布也不同，模式值定义为

$$V=\frac{2\pi\alpha}{\lambda_0}(NA) \tag{4-28}$$

式中　α——纤芯半径；

λ_0——入射波长。

模式值越大，允许传播的模式值越多。在信息传播中，希望模式值越少越好，若同一

光信号采用多种模式会使光信号成为分不同时间到达的多个信号，导致合成信号畸变。模式值V小，就是α值小即纤芯直径小，只能传播一种模式，称为单模光纤。单模光纤性能最好，畸变小、容量大、线性好、灵敏度高，但制造、连接困难。除单模光纤外，还有多模光纤(阶跃多模、梯度多模)。

3）传播损耗

光纤在传播时，由于材料的吸收、散射和弯曲处的辐射损耗影响，不可避免地要有损耗，称为传播损耗(A)，用衰减率A(单位为dB/km)表示：

$$A=\frac{-10\lg(I_1/I_2)}{l} \tag{4-29}$$

式中　l——光纤长度；

I_1——输出端光强；

I_2——输入端光强。

一根衰减率为10dB/km的光纤，表示当光纤传输1km后，光强下降到入射时的1/10。目前，光纤传播损耗可达0.16dB/km。

3. 光纤传感器类型

光纤目前可以测量70多种物理量，光纤的类型较多，大致可分为功能型和非功能型两类。

1）功能型光纤传感器

功能型(又称传感型)光纤传感利用了光纤本身对外界被测对象敏感，并具备检测功能的特点。光纤不仅起到传光作用，而且在被测对象作用下，光强、相位、偏振态等光学特性得到调制，调制后的信号携带了被测信息。如果外界作用时光纤传播的光信号发生变化，使光的路程改变，相位改变，将这种信号接收处理后，可以得到被测信号的变化。

2）非功能型光纤传感器

非功能型(又称传光型)光纤传感的光纤只当做传播光的媒介，待测对象的调制功能是由其他光电转换元件实现的，光纤的状态是不连续的，光纤只起传光作用。

4. 反射式光纤位移传感器

机械量通常需转换成位移来检测，利用光纤可实现无接触位移测量。图4-28所示为光纤位移测量原理图，光源经一束多股光纤将光信号传送至端部，并照射到被测目标上。另一束光纤接收反射的光信号，并通过光纤传送到光敏元件上，两束光纤在被测目标附近汇合。如被测目标与光纤间距离变化，则反射到接收光纤上光通量发生变化，通过光电传感器可检测出距离的变化。

反射式光纤位移传感器一般是将发射和接收光纤捆绑组合在一起，组合的形式不同，有半分式、共轴式和混合式等几种，如图4-29所示。混合式灵敏度高，半分式测量范围大。

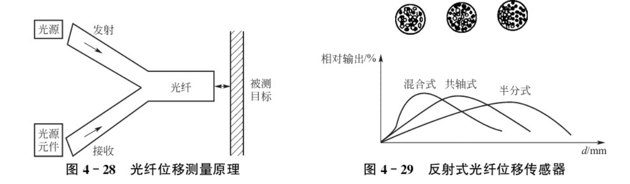


图4-28　光纤位移测量原理　　**图4-29　反射式光纤位移传感器**

图 4-30 给出了反射式光纤位移传感器工作原理和位移输出曲线，由于光纤有一定的数值孔径，当光纤探头端紧贴被测物体时，发射光纤中的光信号不能反射到接收光纤中，接收光敏元件无光电信号。

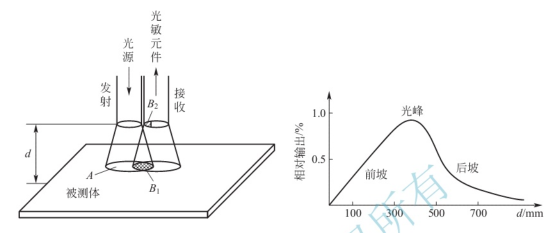


图 4-30　反射式光纤位移传感器工作原理和位移输出曲线

当被测物体逐渐远离光纤时，距离 d 减小，发射光纤照亮被测物体的表面积 B_1 越来越大，接收光纤照亮的区域 B_2 越来越大。当整个接收光纤被照亮时，输出达到最大，相对位移输出曲线达到光峰值。

被测体继续远离时，光强开始减弱，部分光线被反射，输出光信号减弱，曲线下降进入“后坡区”。

前坡区——输出信号的强度增加快，这一区域位移输出曲线有较好的线性关系，可进行小位移测量，如微米级测量。

后坡区——信号随探头和被测体之间的距离增加而减弱，该区域可用于距离较远，而灵敏度、线性度要求不高的测量。

光峰区——信号有最大值，其大小决定于被测表面的状态，光峰区域可用于表面状态测量，如工件的光洁度或光滑度。

4.4　力和应力的量测方法

结构静载试验需要测定的力主要有荷载与支座反力，其次有预应力施力过程中钢丝或钢绞线的张力，还有风压、油压、土压力等。力值量测仪器的基本原理都是用一弹性元件去感受力或液压，弹性元件在力的作用下，发生与外力或液压成对应关系的变形。常用的力传感器可分为机械式、电阻应变式和振动弦式等不同类型。由于电测仪器具有体积小、反应快、适应性强及便于自动化等优势，目前使用比较普遍。

4.4.1　机械式荷载传感器

在结构试验中，测定拉力和压力的仪器有各种测力计。测力计的基本原理是利用钢制弹簧、环箍或簧片在受力后产生弹性变形，将其变形通过机械放大后，用指针刻度盘来表

示或借助位移计来反映力的数值。最简单的拉力计就是弹簧式拉力计，它可以直接由螺旋形弹簧的变形求出拉力值。拉力与变形的关系预先经过标定，并在刻度尺上示出。

用于测量张拉钢丝或钢丝绳拉力的环箍式拉力计如图 4-31 所示。它由两片弓形钢板组成一个环箍。在拉力作用下，环箍产生变形，通过一套机械传动放大系统带动指针转动，指针在度盘上的示值即为外力值。

图 4-32 所示是另一种环箍式拉、压测力计。它用粗大的钢环做“弹簧”，钢环在拉力、压力作用下的变形经过杠杆放大后推动位移计工作。位移计示值与环箍变形关系应预先标定，这种测力计大多只用于测定压力。

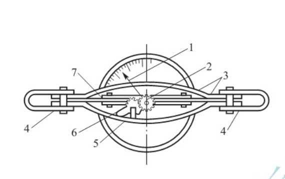


图 4-31　环箍式拉力计

1—指针；2—中央齿轮；3—弓形弹簧；4—耳环；5—连杆；6—扇形齿轮；7—可动接板

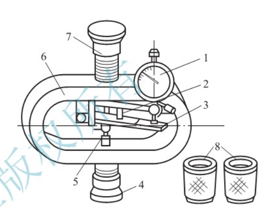


图 4-32　环箍式拉、压力计

1—位移计；2—弹簧；3—杠杆；4—下压头；5—立柱；6—钢环；7—上压头；8—拉力夹头

4.4.2　电阻应变式测力传感器

电阻应变式力传感器是目前应用最广泛的一种测力仪器。它是利用安装在力传感器上的电阻应变片测量传感器弹性变形体的应变，再将弹性体的应变值转换为电信号输出，并用电子仪器显示的测力计，称为测力传感器，也称荷载传感器。根据荷载性质不同，荷载传感器的形式分为拉伸型、压缩型和拉-压型三种。各种荷载传感器的外部形状基本相同，其核心部件是一个厚壁筒，充当线弹性元件。壁筒的横断面取决于材料允许的比例极限。在筒壁上贴有电阻应变片以便将机械变形转换为电量变化。为避免在储存、运输或试验期间损坏应变片，设置有外罩加以保护。为便于设备或试件连接，在筒壁两端加工有螺纹。荷载传感器的负荷能力可达 1000kN 或更高。

如图 4-33 所示，在筒壁的轴向和横向布置应变片，并按全桥接入电阻应变仪工作电桥，进行量测。根据桥路输出特性可求得 $\Delta U_{BD}=\frac{U_{AC}}{4}K\varepsilon\times 2(1+\mu)$，其中 $2\times(1+\mu)=A$。A 为电桥输出放大系数，可提高其量测灵敏度。

荷重传感器的灵敏度可表达为每单位荷重下的应变，与设计的最大应力成正比，与荷重传感器的最大负荷能力成反比，即灵敏度为

$$K_0=\frac{\varepsilon A}{P}=\frac{\sigma A}{PE} \tag{4-30}$$

式中　P、σ——荷重传感器的设计荷载和设计应力；

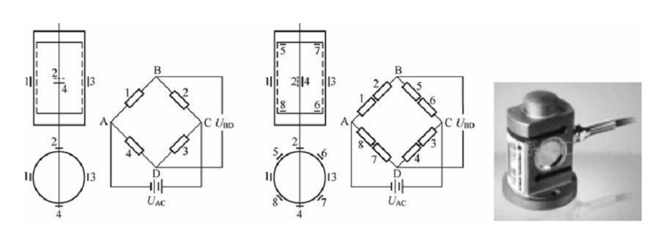


图 4－33　荷载传感器全桥接线及实物图

1～8—电阻应变片

A——桥臂放大系数；

E——荷重传感器材料的弹性模量。

可见，对于一个给定的设计荷载和设计应力，传感器的最佳灵敏度由桥臂放大系数 A 的最大值和 E 的最小值确定。

荷重传感器的构造极为简单，用户可根据实际需要自行设计和制作。但应注意，必须选用力学性能稳定的材料做筒壁，选择稳定性好的应变片及粘合剂。传感器投入使用后，应当定期标定以检查其荷载应变的线性性能和标定常数。

4.4.3　结构内部应力测定

在土木工程实践中，当需要测定结构内部混凝土或钢筋的应力时，有时可采用埋入式测力装置。图 4－34 所示的埋入式应力栓，由混凝土或砂浆制成，埋入试件后便置换了一小块混凝土。在应力栓上贴有两片电阻应变片。应力栓和混凝土的应力应变关系借助胡克定律可知：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_c&=E_c\varepsilon_c\\ \sigma_m&=E_m\varepsilon_m\end{aligned}\right\}\tag{4-31}$$

由此可得

$$\sigma_m=\sigma_c(1+C_s)；\quad \varepsilon_m=\varepsilon_c(1+C_\varepsilon)\tag{4-32}$$

式中　C_s——应力栓的应力集中系数；

C_ε——应变增大系数。

对于特定的应力栓，C_s、C_ε 为常数，但由于混凝土和应力栓的物理性能不完全匹配，因此应变增大系数基本上属于在测量结果中所引入的误差，如弹性模量、泊松比和热膨胀系数的差异所产生的误差。通过适当的标定方法和尽可能减少不匹配因素，可使误差降低至最小。试验证明，最小的误差可控制在 0.5%以下。室温下，一年内的漂移量很小，可以忽略不计。

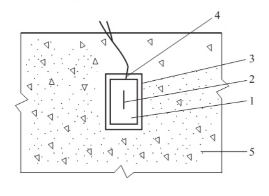


图 4－34　埋入式应力栓

1—与试件同材料的应力栓；2—应变片；3—防水层；4—引出线；5—试件

图 4－35 所示为埋入式差动电阻应变计，它主要用于测定各种大型混凝土结构的应变、裂缝或钢筋应力等。使用时直接将其埋入混凝土内，两端凸缘与混凝土或钢筋相连。试件受力后，两端的凸缘随之发生相对移动，使电阻 R_1 和 R_2 分别产生大小相等、方向相反的电阻增量，将其接入应变电桥便可测得应变值。

图 4－36 所示为振弦式应变计，它依靠改变受拉钢弦的固有频率进行工作。钢弦密封在金属管内，在钢弦中部用激励装置拨动钢弦，再用同样的装置接收钢弦产生的振动信号，并将其传送至显示或记录仪表。当应变计上的圆形端板与混凝土浇为一体时，混凝土发生的任何应变都将引起端板的相对移动，从而导致钢弦的原始张力或振动频率发生变化，由此可换算求得结构内部的有效应变值。

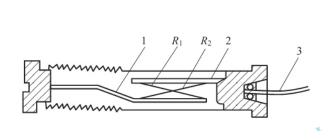


图 4－35　埋入式差动电阻应变计

1、2—刚性支架；3—引出线

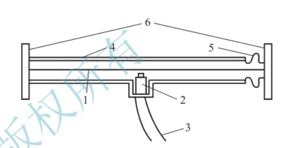


图 4－36　振弦式应变计

1—钢弦；2—激振丝圈；3—引出线；
4—管体；5—波纹管；6—端板

这种振弦式应变计常用于测量预应力混凝土结构的内部应力。它的工作稳定性好，分辨率高达 0.1$\mu\varepsilon$，室温下年漂移量仅为 1$\mu\varepsilon$。

4.5　裂缝与温度量测

4.5.1　裂缝量测

对于钢筋混凝土结构，裂缝的产生和发展是结构反应的重要特征。对于钢结构，常见的断裂发生在应力集中的部位和焊缝部位。裂缝量测的目的是确定裂缝的类型、形态和裂缝的性质，分析产生裂缝的原因，从而对症下药，采取有效的方法、有利的时间封闭和处理裂缝，保证结构构件的正常使用。

1. 裂缝量测的内容

裂缝测量主要有三项内容：①开裂，即裂缝的特征和分布；②度量，即裂缝的宽度、长度和深度；③走向，即裂缝发展的过程和趋势。

裂缝宽度是判断裂缝对结构、构件使用性和承载能力影响程度的最主要参数，也是分析开裂原因、推断修补与加固与否、选择修补或加固方法的重要依据。检测裂缝宽度变化情况，是为了判断该裂缝是静止裂缝还是活动裂缝。

裂缝深度的检测，主要是用于判别裂缝是否贯通，其表里是否不一。裂缝的趋势测量

是一项重要内容，即测量裂缝是发展还是趋于稳定，裂缝的趋势对什么时候处理、处理什么内容、如何处理裂缝具有重要意义。

裂缝长度与分析开裂原因及判断是否需要修补、加固的关系不大。裂缝长度主要为掌握修补规模和估算工程费用。

2. 裂缝宽度量测仪器

1）读数显微镜

裂缝宽度的量测常用读数显微镜，它是由光学透镜与游标刻度等组成的复合仪器，如图 4－37 所示。它主要由物镜、目镜、刻度分划板等机械系统组成。试件表面的裂缝经物镜在刻度分划板上成像，然后经过目镜进入肉眼。为了提高量测精度，可用增加微调读数鼓轮等机械系统的方法；还可在光学系统中相应地增加一个可动的下分划板，由微调螺丝和分划板弹簧共同来调整刻度长线的位置。由于微调螺丝的螺距和上分划板的分划值均为 1mm，所以读数鼓轮转动一圈，下分划板上的长线相对上分划板也移动一刻度值。读数鼓轮分成 100 刻度，每一刻度值等于 0.01mm，量程为 3～8mm 不等。读数显微镜的优点是精度高；缺点是每读一次都要调整焦距，测读速度比较慢。

2）裂缝读数卡

图 4－38 给出了印有许多不同宽度线条的裂缝读数卡示意图，其宽度为标准宽度，将标准宽度线条与裂缝放在一起，用放大镜比照以估计裂缝宽度。

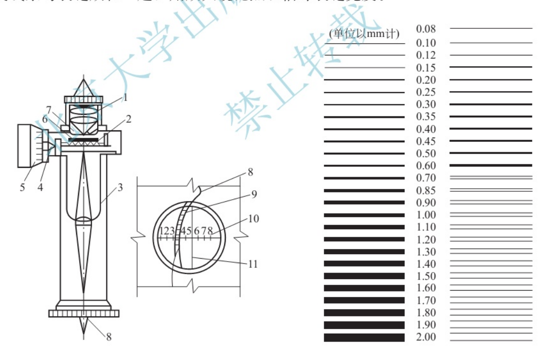


图 4－37 读数显微镜

1—目镜组；2—分滑板弹簧；3—物镜；
4—微调螺栓；5—微调鼓轮；6—可动下分划板；
7—上分划板；8—裂缝；9—放大后的裂缝；
10—上下分滑板刻度板；11—下分划板刻度长线

图 4－38 裂缝读数卡示意图

3. 裂缝量测的其他方法

1）肉眼观察

目前，常用于发现裂缝的最简便方法是借助于放大镜用肉眼观察。在试验前用纯石灰水溶液均匀地刷在结构表面并等待干燥。当试件受外载作用后，白色涂层将在高应变下开裂并剥落。在钢结构表面可以看到屈服线条，在混凝土表面裂缝也会明显地显示出来。研究墙体结构表面开裂时，在白灰层干燥后画出 50mm 左右的方格栅，以构成基本参考坐标系，便于分析和描绘墙体在高应变场中的裂缝发展和走向。用白灰涂层具有效果好，价廉和使用技术要求不高等优点。

2）贴应变片

贴应变片也是一种裂缝量测的方法。利用粘贴在混凝土受拉区的电阻应变片，当混凝土开裂时，如果裂缝贯穿电阻应变片，该应变片的读数突变，从而可以判断开裂部位。

3）涂导电漆膜

1975 年美国 BLH 公司研制了一种用导电漆膜来发现裂缝的方法。它是将一种具有小阻值的弹性导电漆涂在经过清洁处理的混凝土表面，涂成长度约 100～200mm、宽 5～10mm 的条带，待干燥后接入电路。当混凝土裂缝宽度达到 0.001～0.004mm 时，由于混凝土受拉，拉长的导电漆膜就会出现火花直至烧断。导电漆膜电路被切断后还可以继续用肉眼进行观察。

4）裂缝塞尺

裂缝宽度还可以用印有不同宽度线条的裂缝标尺与裂缝对比来确定，相当于用一组具有不同厚度的标准塞尺进行插试，正好插入裂缝的塞尺厚度即为该裂缝的宽度。裂缝标尺和塞尺的测量结果较粗略，但能满足一定的使用要求。

5）超声波量测

超声波量测是基于发声原理，采用声传感器捕捉材料开裂时发射声能所形成的声波，经信号转换后，识别裂缝出现的部位。

6）光弹贴片

光弹贴片是在试件表面牢固地粘贴一层光弹薄片。当试件受力后，光弹薄片同试件共同变形，并在光弹薄片中产生相应的应力。若以偏振光照射，由于试件表面事先已经加工磨光，具有良好的反光性(加银粉增加其反光能力)，因而当光穿过透明的光弹薄片后，经过试件表面反射，又第二次通过光弹薄片而射出，若将此射出的光经过分析镜，最后可在屏幕上得到应力条纹，其试验装置如图 4 - 39 所示。由广义虎克定律可知，主应力与主应变的关系为

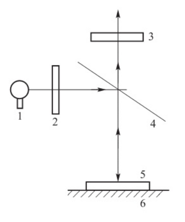


图 4 - 39　光弹贴片装置原理

1—光源；2—λ/4 偏振片；3—λ/4 分析片；4—分光镜；5—贴片；6—试件

$$\left.\begin{aligned}E\varepsilon_1&=\sigma_1-\mu(\sigma_2+\sigma_3)\\E\varepsilon_2&=\sigma_2-\mu(\sigma_3+\sigma_1)\\\sigma_1-\sigma_2&=\frac{E}{1+\mu}(\varepsilon_1-\varepsilon_2)\end{aligned}\right\}\tag{4-33}$$

式中　E——试件弹性模量；

μ——泊松比。

因试件表面有一主应力等于零(如设 $\sigma_3=0$)，因此试件表面主应力差($\sigma_1-\sigma_2$)与主应变差($\varepsilon_1-\varepsilon_2$)成正比。

4.5.2 温度量测

温度是一个基本的物理量。实际结构的应力分布、变形性能和承载能力都可能与温度有十分密切的关系。常温作用下，温度应力常常使混凝土结构出现裂缝。较为典型的是新浇灌的大体积混凝土产生水化热，热加工厂房常年的高温度环境等，这使得温度成为结构设计中必须考虑的因素之一。

测温的方法很多，从测试元件与被测材料是否接触来分，可以分为接触式测温和非接触式测温两大类。接触式测温是基于热平衡原理，测温元件与被测材料接触，两者处在同一热平衡状态，具有相同的温度，如水银温度计和热电偶温度计。非接触式测温是利用热辐射原理，测温元件不与被测材料接触，如红外温度计。以下主要介绍温度量测仪器中的热电偶温度计和热敏电阻温度计。

1. 热电偶温度计

热电偶的基本原理如图 4-40 所示，它由两种导体 A 和 B 组合成一个闭合回路，并使节点 1 和节点 2 处于不同的温度 T 及 T_0。例如，测温时将节点 1 置于被测温度场中(节点 1 称工作端)，使节点 2 处于某一恒定温度状态(称为参考端)。由于互相接触的两种金属导体内自由电子的密度不同，在 A、B 接触处将发生电子扩散。电子扩散的速率和自由电子的密度与金属所处的温度成正比。假设金属 A 和 B 中的自由电子密度分别为 N_A 和 N_B，且 $N_A>N_B$，在单位时间内由金属 A 扩散到金属 B 的电子数，比从金属 B 扩散到金属 A 的电子数要多。这样，金属 A 因失去电子而带正电，金属 B 因得到电子而带负电，于是在接触点处便形成了电位差，从而建立电势与温度的关系，即可测得温度。根据理论推导，回路的总电势与温度的关系为

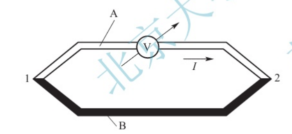


图 4-40 热电偶原理

A、B—导体；1、2—节点

$$E_{AB}=E_{AB}(T)-E_{AB}(T_0)=\frac{k}{e}(T-T_0)\ln\frac{N_A}{N_B} \quad (4-34)$$

式中 T、T_0——A、B 两种材料接触点处的绝对温度；

e——电子的电荷量，约为 4.802×10^{-10}；

k——波尔兹曼常数，等于 1.38×10^{-16}；

N_A、N_B——金属 A、B 的自由电子密度。

热电偶温度计一般适用于 500℃以上的高温度量测，在结构防火抗火试验中，通常使用热电偶温度计。对于中、低温环境，因为温度较低时，使用热电偶测温就不一定合适，因为温度较低时热电偶输出的热电势很小，影响测量精度，参考端(冷却)也很容易受环境影响而导致补偿困难。

2. 热敏电阻温度计

当温度较低时，可采用金属丝热电阻或热敏电阻温度计。常用的金属测温电阻有铂热电阻和铜热电阻，这种电阻可以将温度的变化转换为电阻的变化，因此温度的测量转化为电阻的测量。类似于应变的测量转化为电阻应变片的电阻测量，可以采用电阻应变仪测量热电阻的微小电阻变化。热敏电阻是金属氧化物粉末烧结而成的一种半导体，与金属丝热电阻相同，其电阻值也随温度而变化，一般热敏电阻的温度系数为负值，即温度上升时电阻值下降。热敏电阻的灵敏度很高，可以测量 0.001～0.0005℃的微小温度变化。此外，它还有体积小、动态响应速度快、常温下稳定性较好，价格便宜等优点。电阻应变仪也可以测量热敏电阻的微小电阻变化。热敏电阻的主要缺点是电阻值较分散，测温的重复性较差，老化快。

4.6　测振传感器

振动参数可以通过不同的方法进行量测，如机械式振动测量仪、光学测量系统及电测法等。电测法将振动参量(位移、速度、加速度)转换成电量，而后用电子仪器进行放大、显示或记录。电测法灵敏度高，且便于遥控、遥测，是目前最常用的方法。

振动量测设备由感受、放大和显示记录三部分组成。振动量测中的感受部分常称为拾振器(或称测振传感器)，它和静力试验中的传感器有所不同，是将机械信号转换成电信号的敏感元件。振动量测中的放大器不仅将信号放大，还可将信号进行积分、微分和滤波等处理，可分别量测出振动参量中的位移、速度及加速度。显示记录部分是振动测量系统中的重要部分，在动力问题的研究中，不但需要量测振动参数的大小量级，还需要量测振动参数随时间历程变化的全部数据资料。

4.6.1　拾振器的基本原理

由于结构振动具有传递作用，做动力试验时很难找到一个静止点作为测振的基准点，为此，必须在测振仪器内部设置惯性质量弹簧系统，建立一个基准点。这样的拾振器称为惯性式测振传感器，其力学模型如图 4 - 41 所示。使用时将拾振器安放在振动体的测点上并与振动体紧密固定成一体，仪器外壳与振动体一起振动。拾振器的输出信号和质量块与振动体之间的相对运动直接有关。下面讨论在怎样的条件下，拾振器才能正确反映被测物体的振动参量。

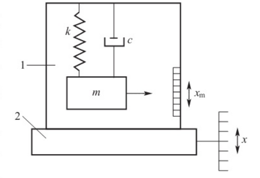


图 4 - 41　拾振器的力学模型
1—拾振器；2—振动体

设计拾振器时，一般使惯性质量 m 只能沿 x 方向运动，并使弹簧质量和惯性质量 m 相比，小到可以忽略不计。由质量块 m 所受的惯性力、阻尼力和弹性力之间的平衡关系，可建立振动体系的运动微分方程：

$$m(\ddot{x}+\ddot{x}_m)+c\dot{x}_m+kx_m=0 \tag{4-35}$$

式中 x——振动体相对于固定参考坐标的位移；

x_m——质量 m 相对于仪器外壳的位移；

c——阻尼系数；

k——弹簧刚度。

设振动体按正弦规律振动

$$x=X_0\sin\omega t \tag{4-36}$$

式中 X_0——被测振动体的振幅；

ω——被测振动的圆频率。

将式(4－36)代入式(4－35)，得

$$\ddot{x}_m+2\xi\omega_0\dot{x}+\omega_0^2x=X_0\omega^2\sin\omega t \tag{4-37}$$

式中 ω_0——质量弹簧系统的固有频率，$\omega_0=\sqrt{\frac{k}{m}}$；

ξ——阻尼比，$\xi=\frac{c}{2m\omega_0}$。

这是单自由度有阻尼系统的强迫振动方程，其通解为

$$x_m=Be^{-\xi\omega_0 t}\cos(\omega_0\sqrt{1-\xi^2}\,t+\alpha)+X_m\sin(\omega t-\varphi) \tag{4-38}$$

式中第一项为自由振动解，由于阻尼作用，很快衰减；第二项为强迫振动解，X_m 为质量块 m 的相对振幅，φ 为相位角，其值分别按下列两式确定：

$$\frac{X_m}{X_0}=\frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2+\left(2\xi\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \tag{4-39}$$

$$\varphi=\arctan\frac{2\xi\frac{\omega}{\omega_0}}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \tag{4-40}$$

根据式(4－39)和式(4－40)，以 ω/ω_0 为横坐标，以 X_m/X_0 和 φ 纵坐标，并使用不同的阻尼比绘制出的曲线如图 4－42 和图 4－43 所示，分别称为测振仪器的幅频特性曲线和相频特性曲线。

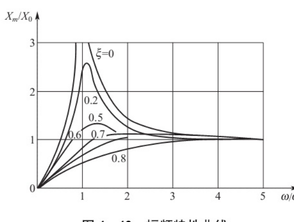


图 4－42 幅频特性曲线

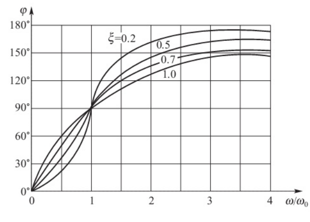


图 4－43 相频特性曲线

在试验过程中，ξ可能随时发生变化。分析图 4－42 和图 4－43 中的曲线，为使 X_m/X_0 和 φ 在试验期间保持常数，必须限制 ω/ω_0。当取不同频率比 ω/ω_0 和阻尼比 ξ 时，拾振器将输出不同的振动参数。

1. 当 $\omega/\omega_0\gg 1$，$\xi<1$ 时，有 $X_m\approx X_0$，$\varphi\approx 180^\circ$

代入式(4－38)得测振仪器强迫振动解为

$$x_m=X_m\sin(\omega t-\varphi)\approx X_0\sin(\omega t-\pi) \tag{4-41}$$

由于此时振动体振动频率比仪器的固有频率大很多，不管阻尼比 ξ 是大还是小，X_m/X_0 趋近于 1，而 φ 趋近于 180°。也就是说质量块的相对振幅和振动体的振幅趋近于相等而相位相反，这是测振仪器理想的工作状态，满足此条件的测振仪称为位移计。要保证达到理想状态，只有在试验过程中使 X_m/X_0 和 φ 保持常数。但从图 4－42 和图 4－43 可见，X_m/X_0 和 φ 都随阻尼比 ξ 和频率而变化，这是由于仪器的阻尼取决于内部构造、连接和摩擦等不稳定因素而引起的。然而从幅频特性曲线中不难发现，当 $\omega/\omega_0\gg 1$ 时，这种变化基本上与阻尼比 ξ 无关。

实际使用中，当测定位移的精度要求较高时，频率比可取其上限，即 $\omega/\omega_0>10$。对于精度为一般要求的振幅测定，可取 ω/ω_0 为 5～10，这时仍可近似地认为 X_m/X_0 趋近于 1，但是有一定的误差。幅频特性曲线平直部分的频率下限，与阻尼比有关，对于无阻尼或小阻尼的频率下限可取 ω/ω_0 为 4～5，当 ξ 为 0.6～0.7 时，频率比下限可放宽到 2.5 左右，此时幅频特性曲线有最宽的平直段，也就是有较宽的频率使用范围。但在被测振动体有阻尼情况下，仪器对不同振动频率呈现出不同的相位差，如图 4－43 所示。如果振动体的运动不是简单的正弦波，而是两个频率 ω_1 和 ω_2 的叠加，则由于仪器对相位差的反应不同，测出的叠加波形将发生失真。所以应注意关于波形畸变的限制。

应该注意，一般厂房、民用建筑的第一自振频率为 2～3Hz，高层建筑为 1～2Hz，高耸结构物如塔、电视塔等柔性结构的第一自振频率更低。这就要求拾振器具有很低的自振频率。为降低 ω_0 必须加大惯性质量，因此，一般位移拾振器的体积较大也较重，使用时对被测系统有一定影响，特别是对于一些质量较小的振动体就不太适用，必须寻求其他的解决办法。

2. 当 $\omega/\omega_0\approx 1$，$\xi\gg 1$ 时，有 $\dfrac{X_m}{X_0}\approx\dfrac{\omega}{2\xi\omega_0}$

因为

$$v=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=X_0\omega\cos\omega t=X_0\omega\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right) \tag{4-42}$$

而

$$x_m=X_m\sin(\omega t-\varphi)\approx\frac{1}{2\xi\omega_0}X_0\omega\sin(\omega t-\varphi) \tag{4-43}$$

比较式(4－42)和式(4－43)可见，这时拾振器反应的示值与振动体的速度成正比，故称为速度计。$1/(2\xi\omega_0)$为比例系数，阻尼比 ξ 越大，拾振动器输出灵敏度越低。设计速度计时，由于要求的阻尼比 ξ 很大，相频特性曲线的线性度就很差，因而对含有多频率成分波形的测试失真也较大。速度拾振器的可用频率范围非常窄，因而在工程中很少使用。

3. 当 $\omega/\omega_0\ll 1$，$\xi<1$ 时，有 $\dfrac{X_m}{X_0}\approx\dfrac{\omega^2}{\omega_0^2}$，$\varphi\approx 0$

因为

$$a=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}=-X_0\omega^2\sin\omega t=X_0\omega^2\sin(\omega t+\pi) \tag{4-44}$$

而

$$x_m=X_m\sin(\omega t-\varphi)\approx\frac{1}{\omega_0^2}X_0\omega^2\sin\omega t=\frac{1}{\omega_0^2}A\sin\omega t \tag{4-45}$$

比较式(4-44)和式(4-45)，这时拾振器反应的位移与振动体的加速度成正比，比例系数为 $1/\omega_0^2$。这种拾振器可以用于测量加速度，称为加速度计。加速度幅频特性曲线如图 4-44 所示。由于加速度计用于频率比 $\omega/\omega_0\ll1$ 的范围内，拾振器反应相位与振动体加速度的相位差为 180°，基本上不随频率而变化。当加速度计的阻尼比 ξ 为 0.6～0.7 时，由于相频曲线接近于直线，所以相频与频率比成正比，波形不会出现畸变。若阻尼比不符合要求时，将出现与频率比成非线性的相位差。

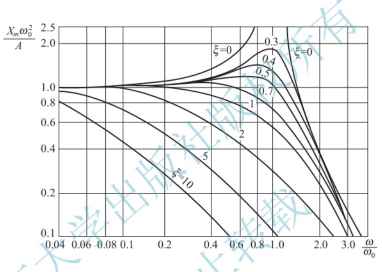


图 4-44　加速度拾振器的幅频特性曲线

综上所述，使用惯性式拾振器，必须特别注意振动体的工作频率与拾振器的自振频率之间的关系。当 $\omega/\omega_0\gg1$ 时，拾振器可以很好地量测振动体的振动位移；当 $\omega/\omega_0\ll1$ 时，拾振器可以准确地反映振动体的加速度特性，对加速度进行两次积分就可得到位移。

4.6.2　拾振器的换能原理

在惯性式拾振器中，质量弹簧系统将振动参数转换成质量块相对于仪器外壳的位移，使拾振器可以正确反映振动体的位移、速度和加速度。但由于测试工作的要求，拾振器除应正确反映振动体的振动外，尚应不失真地将位移、速度及加速度等振动参量转换为电量，以便使用电量进行量测。转换的方法有多种，如利用磁电感应原理、压电晶体材料的压电效应原理、机电耦合伺服原理以及电容、电阻应变、光电原理等。其中磁电式拾振器能线性地感应振动速度，所以通常又称“感应式速度传感器”。它适用于实际结构的振动量测。因为压电晶体式拾振器体积较小、重量轻、自振频率高，故适用于模型结构试验。以下介绍常用的拾振器换能原理。

1. 磁电式速度传感器

磁电式速度传感器基于电磁感应原理制成，特点是灵敏度高、性能稳定、输出阻抗

低、频率响应范围有一定宽度，通过对质量弹簧系统参数的不同设计，可以使传感器既能测量非常微弱的振动，也能测量比较强的振动，是多年来工程振动测量常用的测振传感器。

图 4－45 所示为一种典型的磁电式速度传感器，磁钢和壳体固接安装在所测振动体上，并与振动体一起振动。芯轴与线圈组成传感器的可动系统(质量块)，由簧片与壳体连接，质量块测振时惯性质量块和仪器壳体相对移动，因而线圈和磁钢也相对移动，从而产生感应电动势。根据电磁感应定律，感应电动势 E 的大小为

$$E=BLnv \tag{4-46}$$

式中　B——线圈在磁钢间隙的磁感应强度；

L——每匝线圈的平均长度；

n——线圈匝数；

v——线圈相对于磁钢的运动速度，即所测振动物体的振动速度。

从上式可以看出对于确定的仪器系统，B、L、n 均为常量，所以感应电动势 E，即测振传感器的输出电压是与所测振动的速度成正比的。对于这种类型的测振传感器，惯性质量块的位移反映所测振动的位移，而传感器输出的电压与振动速度成正比，所以也称为惯性式速度传感器。

建筑工程经常需要测 10Hz 以下甚至 1Hz 以下的低频振动，这时常采用摆式测振传感器，这种类型的传感器将质量弹簧系统设计成转动的形式，因而可以获得更低的仪器固有频率。图 4－46 所示是典型的摆式测振传感器，根据所测振动是垂直方向还是水平方向，摆式测振传感器有垂直型、倒立摆和水平摆等几种形式。摆式测振传感器也是磁电式传感器，它与差动式的分析方法是一样的，输出电压也与振动速度成正比。

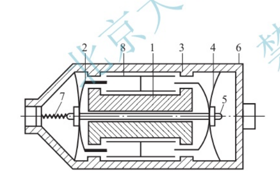


图 4－45　磁电式速度传感器

1—磁钢；2—线圈；3—阻尼环；4—弹簧片；5—芯轴；6—外壳；7—输出线；8—铝架

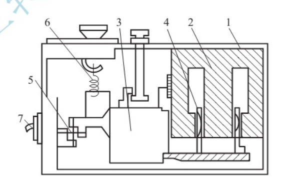


图 4－46　摆式传感器

1—外壳；2—磁钢；3—重锤；4—线圈；5—十字弹簧；6—弹簧；7—输出线

2. 压电式加速度传感器

从物理学可知，某些晶体当受到压力并产生机械形变时，在它们相应的两个表面上出现异号电荷，当外力去掉后，又重新回到不带电状态，这种现象称为压电效应。压电晶体受到外力产生的电荷 Q 由式(4－47)表示：

$$Q=G\sigma A \tag{4-47}$$

式中　G——晶体的压电常数；

σ——晶体的压强；

A——晶体的工作面积。

压电式加速度传感器是一种利用晶体的压电效应把振动加速度转换成电荷量的机电换能装置。这种传感器具有动态范围大(可达 10^5g)、频率范围宽、质量轻、体积小等特点。因此被广泛应用于振动测量的各个领域，尤其在宽带随机振动和瞬态冲击等场合，几乎是唯一合适的测试传感器。

压电式加速度传感器的结构原理如图 4－47 所示，压电晶体片上的质量块 m，用硬弹簧将它们夹紧在基座上。传感器的力学模型如图 4－48 所示，质量弹簧系统的弹簧刚度由硬弹簧的刚度 k_1 和晶体的刚度 k_2 组成，因此 $k=k_1+k_2$。阻尼系数 $c=c_1+c_2$。在压电式加速度传感器内，质量块的质量 m 较小，阻尼系数也较小，而刚度 k 很大，因而质量、弹簧系统的固有频率 $\omega_0=\sqrt{k/m}$，根据用途可达若干千赫兹，高的甚至可达 100～200kHz。

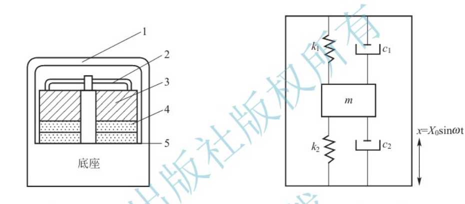


图 4－47　压电式加速度传感器的结构原理
1—外壳；2—硬弹簧；3—质量块；
4—压电晶体；5—输出端

图 4－48　传感器的力学模型

由前面的分析可知，当被测物体的频率 $\omega \ll \omega_0$ 时，质量块相对于仪器外壳的位移就反映所测振动的加速度值。

压电式加速度传感器的主要技术指标有：灵敏度、安装谐振频率、频率响应、横向灵敏度比和幅值范围(动态范围)等。使用时根据其使用说明书上的技术指标加以选择。

除上述惯性拾振器外，还有非接触式拾振器和相对拾振器。它们的转换原理都是磁电式。非接触式是依靠振动体和传感器之间的间隙随振动而变化致使磁阻发生变化，当被测物体为非导磁材料时，需在测点处贴一导磁材料，其灵敏度与拾振器和振动体之间的间距、振动体的尺寸以及导磁性等有关，量测的精度不很高，可用在不允许把拾振器装在振动体上的情况，如高速旋转轴或振动体本身质量小，装上拾振器后拾振器的附加质量对它的影响很大等情况。相对拾振器能测量两个振动物体之间的相对运动，使用时，将其外壳和顶杆分别固定在被测的两个振动体上。当然，如将其外壳固定在不动的地面上，便可测振动体的绝对运动。

3. 测振放大器

测振放大器是振动测量系统的一个重要的中间环节。传感器的信号往往难以直接显示或记录，需要放大(或衰减)。

1) 电压放大器

测振放大器除了有放大(或衰减)功能外，还有模拟运算的功能。磁电式的拾振器的输

出电动势与被测振动体的振动速度成正比，使用微分电路则可获得加速度信号；使用积分电路则可获得位移信号。而压电式加速度拾振器输出的电荷与被测振动体的加速度成正比，使用积分电路可获得速度信号，再使用一次积分电路则可获得位移信号。故使用微积分电路是很有实际意义的。

微积分电路是由串入电路中的电阻、电容、电感元件所构成的，如图 4-49 所示。其回路电流为 I，由基尔霍夫定律则有：

$$U = U_R + U_C + U_L = RI + \frac{1}{C}\int I\mathrm{d}t + L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} \tag{4-48}$$

选择此电路的 U_C 和 U_L 之一，且 R 阻抗足够大，则可分别使输出电压与输入电压呈积分和微分关系。

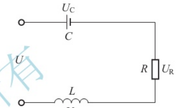


图 4-49　微积分电路原理

(1) 积分电路原理。由选择开关将图 4-49 中的电感短接，取电容两端为电压输出端 $U_{C(出)}$：

$$U_{C(出)} = \frac{1}{C}\int I\mathrm{d}t \tag{4-49}$$

由于
$$I=\frac{U_{(入)}}{\sqrt{R^2+\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

当 $R\gg\frac{1}{\omega C}$ 时，则
$$I=\frac{U_{(入)}}{R}$$

则有
$$U_{C(出)}=\frac{1}{C}\int\frac{U_{(入)}}{R}\mathrm{d}t=\frac{1}{CR}\int U_{(入)}\mathrm{d}t \tag{4-50}$$

故输出电压将输入电压进行了一次积分。

(2) 微分电路原理。由选择开关将图 4-49 中的电容短接，取电感两端为电压输出端 $U_{L(出)}$，此时：

$$U_{L(出)}=L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} \tag{4-51}$$

由于
$$I=\frac{U_{(入)}}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}}$$

当 $R\gg\omega L$ 时，则
$$I=\frac{U_{(入)}}{R}$$

则有
$$U_{L(出)}=L\left[\frac{\mathrm{d}\left(\frac{U_{(入)}}{R}\right)}{\mathrm{d}t}\right]=\frac{L}{R}\left(\frac{\mathrm{d}U_{(入)}}{\mathrm{d}t}\right) \tag{4-52}$$

故输出电压将输入电压进行了一次微分。

2) 电荷放大器

电荷放大器只适用于输出为电荷的传感器。它的功能即将输出电压正比于能产生电荷的传感器输出的电荷，如图 4-50 所示。图中 A 为放大器的放大增益；C_i 是压电式拾振器的电容、输入电缆分布电容和放大器输入电容等合成的等效电容；q 是压电式拾振器产生的电荷。U_0 是电荷放大器输出电压：

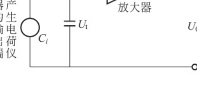


图 4-50　电荷放大器原理

$$U_0=AU_i=A\frac{q}{C_i} \tag{4-53}$$

式中，A、C_i 为定值，输出电压 U 正比于输入电荷 q，即

$$U_0 = Kq \tag{4-54}$$

式中　K——放大倍数。

由于电荷放大器的输出电压与连接它的电缆电容无关，故电缆的传输距离可达数百米，有利于远距离测试。

3）动态电阻应变仪

动态电阻应变仪主要用于测量数值或方向随时间而变化的应变，即动应变。由于动态应变仪是用桥盒的形式引接应变式传感器的电阻应变片来组成单臂电桥(其原理与静态电阻应变仪一样)，所以，它的前一环节(即一次仪表)一定要是应变式的传感器。

动态电阻应变仪除了测动应变外，还可以用于以动应变的测量为“桥梁”，即通过标定，得知某一物理量(如位移、荷载、转角等)与应变量的线性关系，从而可在现场通过动态应变仪的应变量得知此时此刻的某一物理量的具体数值以及它的变化过程。

由于动应变是动态的，它随时间而改变，所以通常动应变是由记录仪以动态曲线来显示的。

在记录仪所记录的动应变曲线上，并没有动应变的刻度。任意时刻的动应变值要有一把测量动应变值的“尺子”。通常人们关心的是它的最大动应变值，下面以求取最大动应变为例介绍其测量方法。

上面讲的这把“尺子”，即是标定。通常动态应变仪都有一个应变的标定电路，当标定旋钮旋至某一应变值时(如 30×10^{-6})，记录仪的记录笔则会向上跳一高度。此高度即是所对应的该应变量(30×10^{-6})。那么其他任意高度也就由此正比关系得知其应变量了。

图 4-51　动态应变仪的应变标定

如图 4-51 所示，最大的正和负的动应变即为

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon_{\max(+)} &= \left(\frac{\varepsilon_0}{\frac{H_1+H_3}{2}}\right)h_1\\ \varepsilon_{\max(-)} &= \left(\frac{-\varepsilon_0}{\frac{H_2+H_4}{2}}\right)h_2\end{aligned}\right\} \tag{4-55}$$

式中　$\varepsilon_{\max(+),(-)}$——最大正(负)动应变；

ε_0——仪器标定电路所产生的标定应变量；

H_1、H_2、H_3、H_4——ε_0 所对应的正(负)标定波高；

h_1、h_2——实测的正(负)波高。

式(4-55)中除以 2 是表示将两次标定高度做算术平均，图 4-51 中高度只要长度单位统一即可。

4. 测振记录仪

在振动测试中，必须研究被测对象的振动过程及规律。记录仪的功用就在于把振动的时间历程记录下来，以便分析研究，它是振动测试不可缺少的仪器设备。

1）光线示波器的基本原理

在 20 世纪 90 年代以前，常见的记录仪主要是光线示波器、磁带记录仪、$x-y$ 函数记录仪等。尤其是光线示波器的使用最为多见。以下简要介绍光线示波器的基本原理。

光线示波器是一种经济、适用的记录仪。它是将放大器输入的电信号转换为光信号，在紫外线感光纸或胶片上感光而记录的一种记录仪。

光线示波器工作原理的核心即是振子的工作原理，如图 4－52 所示。由拾振器的机械振动转化成电信号(波动的电流)，经放大器放大，将其波动的电流输给光线示波器的振子，使振子的线圈成为载流导体，将振子放入固定磁场中，则振子的线圈这一载流导体在磁场力的作用下使线圈及连在它上面的小镜片随载流导体中电流的波动带来磁场力大小的波动而发生偏转。由水银灯照射在摆动的小镜片上而反射到感光记录纸上，而记录纸以一定的速度出纸，并用闪频灯记录下时间标记，由于感光纸的曝光，则记录下了振动波形。

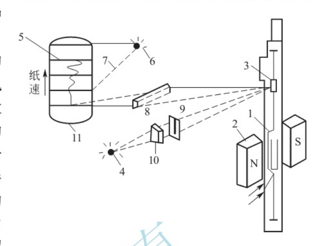


图 4－52　光线示波器的工作原理

1—线圈；2—固定磁场；3—镜片；4—光源；
5—记录波；6—闪频灯；7—时标；
8、10—圆柱透镜；9—光栅；11—记录纸

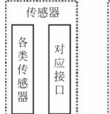
2) 动态数据采集仪

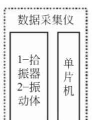
在整个测振仪器系统中，记录仪的更新换代是最为突出的。20 世纪 90 年代以来，随着电子计算机的普及，过去的记录仪如光线示波器、磁带记录仪、$x-y$ 函数记录仪等都已逐步淘汰，取而代之的是动态数据采集仪，它的工作过程由计算机来控制。采集的动态数据可直接由计算机通过专业软件对其进行处理，并在终端显示器显示测试波形。除此之外，还可编制动态数据分析软件对储存下来的动态数据进行各种动态分析、计算。可在时域或频域上任意转换，得出所需的有关参数。振动波形及数据可由打印机输出，大大提高了工作效率，有效地克服了光线示波器等记录仪的种种缺陷。

4.7　数据采集系统

4.7.1　数据采集系统的组成

数据采集系统包括硬件系统和软件系统。硬件系统包括传感器、数据采集仪和计算机(控制与分析器)三个部分，如图 4－53 所示。





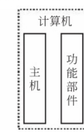


图 4－53　数据采集系统的组成

1. 传感器部分

传感器部分包括各种电测传感器。传感器的作用是感受各种物理量，如力、线位移、角位移、应变和温度等，并把这些物理量转变为电信号。一般情况下，传感

程的原始数据是反映试验结构或试件状态的物理量，如力、应变、线位移、角位移和温度等。这些物理量通过传感器被转换成为电信号，通过数据采集仪的扫描采集进入数据采集仪，再通过数字转换变成数值量，通过系数换算变成代表原始物理量的数值，然后，把这些数据打印输出、存入磁盘，或暂时存在数据采集仪的内存中。通过连接采集仪和计算机的接口，存在数据采集仪内存的数据进入计算机，计算机再对这些数据进行计算处理，如把位移换算成挠度，把力换算成应力等，计算机把这些数据存入文件、打印输出，并可以选择将其中部分数据显示在屏幕上，如位移与荷载的关系曲线等。

数据采集过程是由数据采集程序控制的。数据采集程序主要由两部分组成：第一部分的作用是数据采集的准备；第二部分的作用是正式采集。程序的运行有六个步骤：①启动数据采集程序；②进行数据采集的准备工作；③采集初读数；④采集待命；⑤执行采集（一次采集或连续采集）；⑥终止程序运行。数据采集过程结束后，所有采集到的数据都存在磁盘文件中，数据处理时可直接从这些文件中读取数据。数据采集程序的主框图如图 4 - 55 所示。

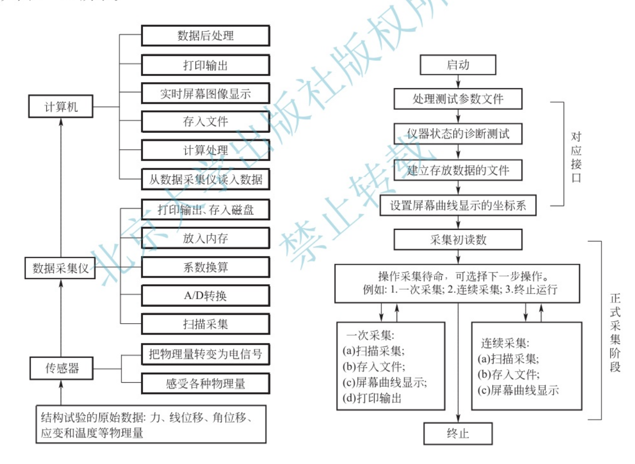


图 4 - 54　数据采集系统组成及数据流通过程　　**图 4 - 55　数据采集程序的主框图**

各种数据采集系统所用的数据采集程序如下。

(1) 生产厂商为该采集系统编制的专用程序，常用于大型专用系统。

(2) 固化的采集程序，常用于小型专用系统。

(3) 利用生产厂商提供的软件工具，用户自行编制的采集程序，主要用于组合式系统。

本章小结

(1) 在结构试验中只有取得了准确的应变、应力、裂缝、位移、速度或加速度等数据，才能通过数据处理和分析得到正确的试验结果，对试件的工作特性有正确了解，从而对结构的性能做出定量的评价，进而为创立新的计算理论提供依据。

(2) 量测仪表包括传感器、放大器、显示器、记录器、分析仪器、数据采集仪或数据采集系统等。传感器能感受各种物理量(力、位移、应变等)，并将感受到的物理量转换成电信号或其他信号；放大器能把传感器传来的信号进行放大，使之可被显示或记录；显示器的功能是把信号用可见的形式显示出来；记录器能把量测得来的数据记录下来，做长期保存；分析仪器的功能是对采集得到的数据进行分析处理；数据采集仪可用于自动扫描和采集，可作为数据采集系统的执行机构；数据采集系统是一种集成式仪器，它包括传感器、数据采集仪和计算机或其他记录器、显示器等，它可用来进行自动扫描、采集，还能进行数据处理。

(3) 应变量测在结构试验量测中占有极重要的地位。直接测定构件截面的应力值目前还较困难，通常的方法是先测定应变，再通过材料的 $\sigma-\varepsilon$ 关系曲线或方程转换为应力值。

(4) 结构位移是结构承受荷载作用后的最直观反应。结构在局部区域内的屈服变形、混凝土局部范围内的开裂以及钢筋与混凝土之间的局部粘结滑移等变形性能，都可以在荷载-位移曲线上得到反映。它反映了结构的整体变形，还可区分结构的弹性和非弹性性质。位移测定对分析结构性能至关重要。

(5) 结构静载试验测定的力，主要是荷载与支座反力，其次有预应力、施力过程中钢丝或钢绳的张力、风压、油压和土压力等。

(6) 在结构试验中，结构或构件裂缝的产生和发展，裂缝的位置、分布、长度和宽度是反应结构性能的重要指标，对确定结构的开裂荷载、研究结构的破坏过程与结构的抗裂及变形性能有十分重要的价值。混凝土结构、砌体结构等脆性材料组成的结构，裂缝测量是一项必需的测量项目。

(7) 振幅、频率、相位及阻尼是动力试验中为获取振型、自振频率、位移、速度和加速度等振动参数所需量测的基本参数。在动力问题的研究中，不但需要量测振动参数的大小量级，还需要量测振动参数随时间历程变化的全部数据资料。

思　考　题

1. 量测仪器通常由哪几部分组成？
2. 量测仪器的主要技术性能指标有哪些？
3. 简述机测仪器与电测仪器的各自特点。
4. 量测仪器的选用原则是什么？
5. 量测仪器为什么要率定？其目的和意义是什么？
6. 如何测定结构的应力？测量应变时对标距有何要求？

7. 使用电阻应变计测量应变时为何要进行温度补偿？温度补偿的方法有哪几种？

8. 简述电阻应变计粘贴的基本要求。

9. 什么是全桥测量和半桥测量？

10. 力的测定方法有哪些？

11. 裂缝测量主要有哪几个项目？裂缝宽度如何测量？

12. 惯性式测振传感器(又称拾振器)的力学原理是什么？怎样才能使测振传感器的工作达到理想状态？

13. 光纤位移传感器的工作原理是什么？突出优点有哪些？

14. 数据采集方法主要有哪几种？简述数据采集系统的组成及数据采集过程。

